

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

В.М. САЛО, П.Г. ЛУЗАН, Д.В. БОГАТИРЬОВ

**НАУКОВІ ОСНОВИ СЕПАРАЦІЇ ЗЕРНА НА РЕШЕТАХ З
КЛИНОПОДІБНОЮ ФОРМОЮ ОТВОРІВ**

МОНОГРАФІЯ

Кіровоград
Видавець Лисенко В.Ф.
2013

УДК 631.362.3

ББК 41.44

С16

Рецензенти:

Дідух В.Ф. – завідуючий кафедрою експлуатації та технічного сервісу машин ім. професора Семковича О.Д. Львівського національного аграрного університету, доктор технічних наук, професор;

Пастухов В.І. – завідуючий кафедрою сільськогосподарських машин ХНТУ ім. Василенка П.М., доктор технічних наук, професор;

Павленко І.І. – завідуючий кафедрою технології машинобудування Кіровоградського національного технічного університету, доктор технічних наук, професор.

Монографію розглянуто й схвалено до друку на засіданні вченої ради Кіровоградського національного технічного університету (протокол № 2 від 30 жовтня 2012 року).

Сало В.М. Технічне забезпечення підготовки зерна до зберігання: [Монографія] / В.М. Сало, П.Г. Лузан, Д.В. Богатирьов.- Кіровоград: СПД ФО Лисенко В.Ф., 2013.- 148 с.

ISBN 978-966-2570-84-7

У монографії наведено вирішення наукової задачі забезпечення працездатності і підвищення ефективності функціонування зерноочисних машин, процес сепарації зерна в яких, проходить під дією інерційно-гравітаційного силового поля без підведення енергії від зовнішніх джерел, на решетах з клиноподібною формою отворів.

Значна увага приділена теоретичному аналізу процесу сепарації зерна на решетах з клиноподібною формою отворів, розмір яких збільшується в напрямку руху оброблюваного матеріалу.

У роботі використані результати власних досліджень, а також результати досліджень українських та зарубіжних вчених.

Монографія призначена для наукових співробітників, аспірантів, магістрантів, конструкторів сільськогосподарської техніки та фахівців сільського господарства.

ББК 41.44

Монографія підготовлена в рамках роботи над виконанням фундаментального дослідження "Науково-технологічні основи та технічне забезпечення підготовки зерна до зберігання", (№ ДР 0112U001105)

ISBN 978-966-2570-84-7

© Сало В.М., Лузан П.Г., Богатирьов Д.В., 2013

© Видавець Лисенко В.Ф., 2013

ВСТУП

Однією із значних проблем у сфері виробництва продукції рослинництва в умовах малих фермерських господарств є створення сприятливих умов для збереження зібраного врожаю, що дозволяє забезпечити високу ефективність аграрного виробництва. Існуючі технології післязбирального обробітку є енергоємними, а якісні показники роботи серійної техніки не в повній мірі відповідають сучасним вимогам. Інтенсифікація післязбиральної обробки зібраного врожаю вимагає нових підходів до організації технологічних процесів очищення.

Важливими факторами інтенсифікації виробництва є розробка і впровадження принципово нових робочих органів і машин, які б забезпечували не тільки значний ріст продуктивності праці, але й суттєву економію матеріальних і енергетичних ресурсів. Необхідність підвищення ефективності роботи зерноочисних машин обумовлюється також жорсткими вимогами до якості зерна, яке надходить для переробки на підприємства борошномельної, круп'яної, масложирової та інших галузей виробництва.

Плоскорешіткові сепаратори, які найбільш розповсюджені в даний час для очищення і сортування зерна, пройшли довгий шлях свого розвитку, і їх техніко-економічні показники досягли своїх граничних значень. Роботи, які проводились останнім часом по подальшій інтенсифікації процесів, що в них проходять, не торкалися їх принципу дії, а були спрямовані до більш детальної оптимізації режимних параметрів і удосконалення окремих вузлів приводу. Витрати енергії на роботу самої машини в десятки разів перевищують витрати енергії на проходження безпосередньо процесу сепарації.

Один із шляхів вирішення задачі пов'язаний з використанням для сепарації інерційних силових полів, які дозволяють інтенсифікувати просіюваність оброблюваного матеріалу за рахунок використання відцентрових сил.

Створені до цього часу відцентрові сепаратори хоч і дозволили збільшити питому продуктивність зерноочисних машин, однак суттєвого зниження матеріало- і енергоспоживання не забезпечили. Застосування відцентрових сил для сепарації зерна в більшості випадків призводить до ускладнення конструкції приводу робочих органів, травмування зерна та інших негативних наслідків.

Проведений огляд і аналіз решітчастих сепараторів дозволив вибрати більш ефективний напрямок розробки машин для очищення зерна, на основі чого визначена перспективна схема сепаратора, процес сепарації в якому проходить під дією інерційно-гравітаційного силового поля без підведення енергії від зовнішніх джерел.

1

СТАН ТЕХНІКИ ТА ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СЕПАРАЦІЇ ЗЕРНА НА РЕШЕТАХ

1.1. Короткий огляд техніки для сепарації зерна на решетах

Найбільш розповсюджений спосіб очищення і сортування зерна – це його розділення на решетах. Тобто, решето є одним із основних елементів робочих органів сучасних зерноочисних машин, які використовуються в різних сферах виробництва і переробки сипких матеріалів. Наявність великої кількості їх варіантів в робочих органах для сепарації зерна (рис.1.1) пояснюється їх особливостями як об'єктів сепарації, великим спектром механічних, фізичних, геометричних, гравітаційних, гігроскопічних і інших властивостей зерна. Хоч ця особливість і розширює можливість створення робочих органів для їх сепарації, однак нестабільність більшості із перелічених ознак призводить до ускладнення конструкції зерноочисних машин.

В даний час розділення зерна за розмірами (по товщині і ширині) більшістю існуючих сепараторів здійснюється на плоских решетах. Найбільш розповсюджені із них є коливні, які отримують привод від кривошипно-шатунного, ексцентриково-шатунного або кулачково-самобалансуючого механізмів. Вони встановлені на вітчизняних і більшості іноземних машин, призначених для первинного очищення і сортування зерна, а також на сепараторах, які використовуються в борошно-круп'яному, елеваторному і комбікормовому виробництвах. За даними ряду авторів [33, 53, 71, 95] питома продуктивність підсівних і сортувальних решіт такого типу для насіння пшениці складає 700-1100 кг/м²·год. Плоскі вібраційні решета, які здійснюють малоамплітудні високочастотні коливання (до 60 коливань в секунду), поки ще не

достатньо добре вивчені, і за думкою деяких авторів [54, 57, 68, 83, 90] є найбільш перспективними. Їх питома продуктивність може досягти 2500-3000 кг/м².

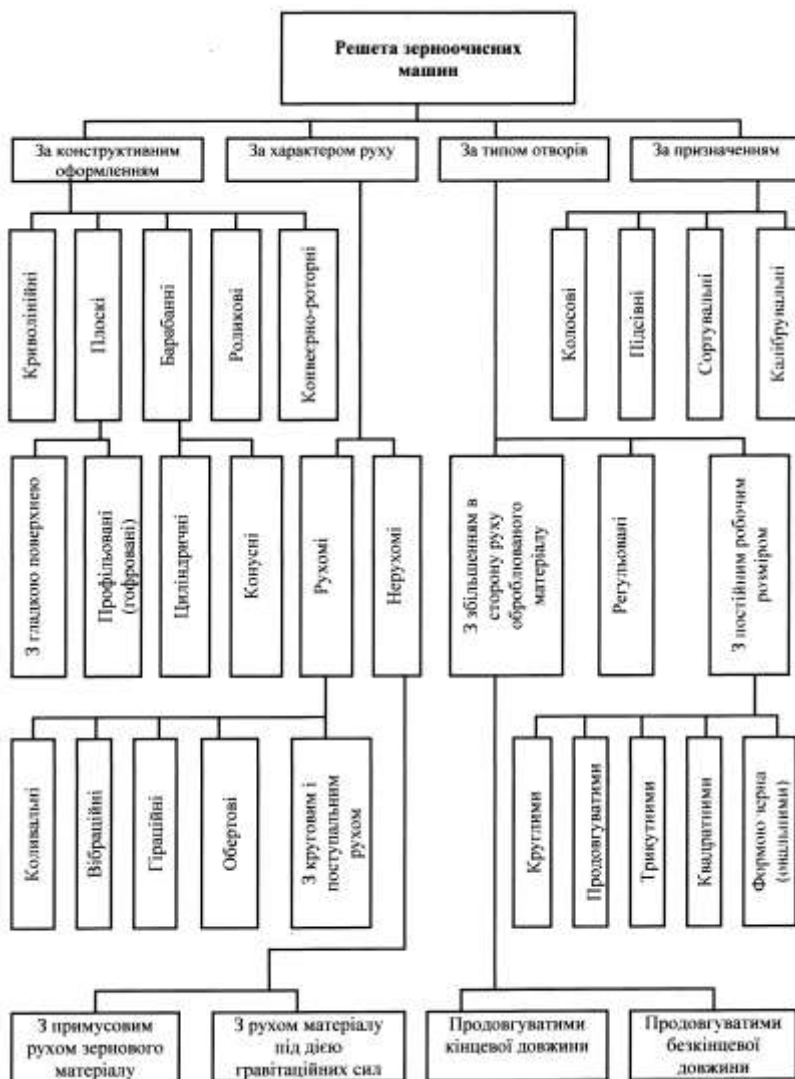


Рис.1.1. Класифікація решіт зерноочисних машин

Бажання збільшити питому продуктивність за рахунок живого перерізу привело до створення решіт без поперечних перемичок з паралельно розташованими і натягнутими струнами діаметром 0,85...1,0 мм, зусилля натягування кожної струни 196-245 Н. Питома продуктивність такого решета на 85% вище продуктивності існуючих плоских пробивних решіт. До недоліків струнного решета відносяться великі зусилля натягування струн і великі габаритні розміри рами, в якій вони закріплюються [33].

Значний інтерес представляє собою гофроване решето [46, 47, 75, 120]. За рахунок використання гофрів значно покращується процес орієнтації зерен. Дослідження, проведені в Ю.І. Єрмольєвим [46, 47] показали, що гофровані решета завдяки раціональній геометрії перетинки, які сприяють швидкій орієнтації зерен і великій площі живого перерізу, дозволяють збільшити продуктивність при очищенні пшениці в 2-3 рази порівняно з продуктивністю існуючих пробивних решіт.

Просіювання часток через отвори існуючих типів і конструкцій плоских (як вібраційних, так і коливних) решіт здійснюється в основному під дією тільки гравітаційних сил, прискорення від яких є обмеженою величиною. Внаслідок цього швидкість проходження часток через їх отвори практично не може бути збільшена, що й обмежує подальше суттєве збільшення їх пропускної спроможності. Тому, подальше підвищення продуктивності решітчастих сепараторів, а також покращення якості їх роботи може бути досягнуто тільки за рахунок збільшення робочої площі і кількості робочих органів, що призведе до підвищення металоємності процесу сепарації.

За думкою авторів [1, 2, 9, 44, 81, 90, 94], перспективною є ідея використання самопотоківних решітчастих сепараторів на підприємствах післязбирального обробітку зерна, оскільки використання його

потенціальної енергії, уже піднятого на деяку висоту для інших технологічних цілей, дуже ефективно використовувати для супутнього його очищення.

За цією ознакою канадська фірма Westward parts [44] випускає вертикальні решітчасті сепаратори моделі 1500-4 (рис. 1.2).

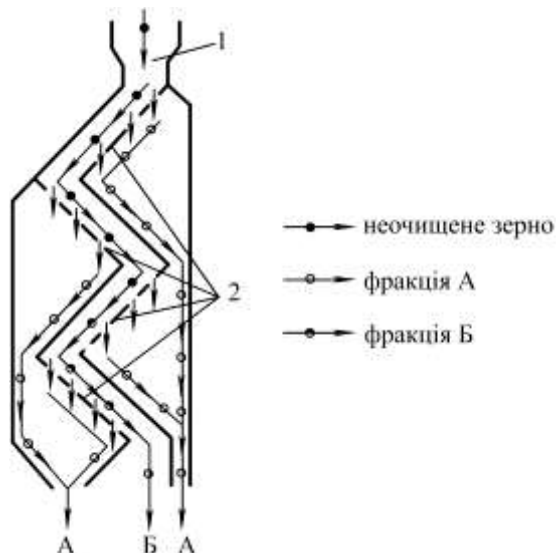


Рис. 1.2. Схема решітчастого сепаратора моделі 1500-4 фірми Westward parts (Канада): 1 – завантажувальний пристрій; 2 – решета

Решета 2, які створюють зигзаподібний канал, встановлені у вертикальну шахту і приєднуються до зернопроводу потокової лінії. Зерно із завантажувального пристрою 1 під дією гравітаційних сил подається на перше похиле плоске решето, потім сходить на друге і т.д. При проходженні через каскад установлених решіт під дією гравітаційних сил воно розділяється на основне зерно і дрібні домішки (фракція А), які направляються в зернопровід, і крупні домішки (фракція Б). Завдяки тому, що в цих сепараторах процес очищення зерна здійснюється при його

русі під дією тільки гравітаційних сил, правомірно назвати такий тип машин самопотоковими. Такий сепаратор забезпечує повноту виділення домішок до 94 %.

Аналогічні сепаратори випускаються також канадською фірмою Parsons моделі PC-1500 (рис. 1.3). За конструкцією і технологічною схемою від розглянутих вище вони відрізняються наявністю різних варіантів пропуску зерна.

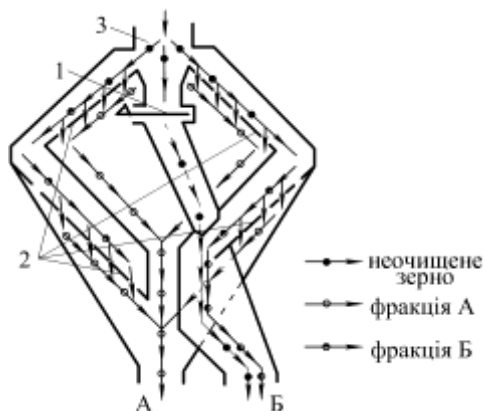


Рис.1.3. Схема решітчастого сепаратора моделі PC-1500 фірми Parsons (Канада): 1 – засувка; 2 – решета; 3 – завантажувальний пристрій

Через завантажувальний пристрій 3 зерно може надходити повністю або частково на плоскі решета 2, що здійснюється за допомогою засувки 1. Для зменшення забивання решіт в таких типах сепараторів їх встановлюють на пружинних підвісках під великим кутом до горизонту. Таке рішення для отримання необхідної ефективності сепарації приводить до збільшення довжини решіт.

В даний час відомі сепаратори, в яких процес розділення сипких матеріалів на фракції здійснюється без підведення енергії від зовнішніх

джерел [60, 100, 102, 105, 106, 107, 110, 111, 112]. За типом решітчастих поверхонь умовно їх можна поділити на дві групи: з перфорованими і колошниковими розподільними поверхнями.

При проведенні процесу розділення перфорованими решітковими поверхнями з особливою гостротою встає проблема очищення отворів [9, 49, 50, 51, 88]. Спроба її рішення шляхом збільшення швидкості руху зерна приводить до змивання дрібної фракції більш крупними частками, внаслідок чого ефективність виділення прохідної фракції значно знижується. Різні технічні рішення, в тому числі закріплення над поверхнею розділення гнучких елементів у вигляді шнурів, які звисають і торкаються нижніми кінцями решета, в повній мірі не усувають відмічених недоліків, в результаті чого повнота виділення прохідної фракції залишається недостатньою. Серед інших варіантів вирішення проблеми незабивання решіт використовуються підпружинені решітчасті поверхні, за рахунок чого вони починають коливатися під дією рухомого зерна. За допомогою цього технічного рішення вдалося у деякій мірі зменшити застрягання часток в отворах решета, але суттєвих результатів самоочищення отворів, і як наслідок підвищення ефективності сепарації досягти не вдалося.

Використання для сепарації колошникових решіт в деякій мірі вирішує проблему очищення отворів. Однак низька сепаруюча здатність цих решітчастих поверхонь обумовила використання їх тільки в якості збагачувачів фракцій переважно в гірничо-рудній промисловості.

Таким чином, в силу приведених причин самопотоків сепаруючі пристрої не знайшли широкого застосування в зернопереробних галузях промисловості.

Застосування М.Є. Авдєєвим [6, 112] в сепараторах подібної конструкції (рис. 1.4 а) решіт з повздовжніми отворами, які розширюються

в бік руху зерна (рис. 1.4 б), дозволило виключити можливість заклинення часток зерна, чим збільшити питому продуктивність та створити можливість отримання фракцій різного гранулометричного складу без заміни решіт.

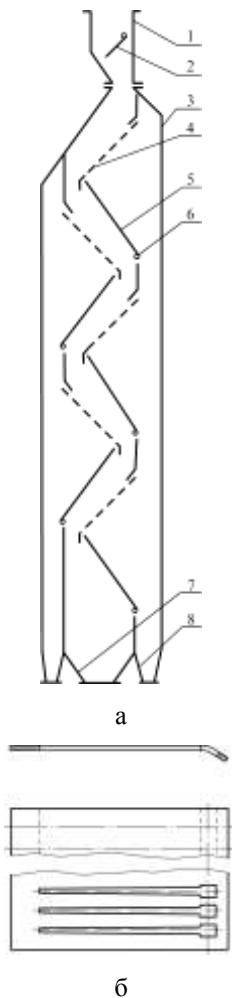


Рис. 1.4. Технологічна схема гравітаційного самопотокowego сепаратора КСМ-1: а – схема технологічного процесу; б – схема решета

На основі цього був створений гравітаційний самопотоковий сепаратор КСМ-1. Він включає завантажувальний пристрій 1 з регулювальною заслінкою 2, корпус 3, який представляє собою вертикальну шахту, решета 4, дефлектори 5, встановлені на рухомих осях 6, розвантажувальні патрубки для виведення розділених фракцій 7 і 8. Решета 4 виготовлені з клиноподібними повздовжніми отворами, які розширюються в напрямку руху зерна, що створює сприятливі умови для просіювання дрібних часток різних розмірів в тому місці клиноподібного отвору, де її ширина відповідає розміру зерна. Зерно із завантажувального пристрою 1 поступає на перше решето 4 і направляється вздовж клиноподібних отворів. Виділення часток через клиноподібні отвори проходить під дією складової сили тяжіння, яка спрямована перпендикулярно до решета. Зерно, яке виділилось, направляється на дефлектор 5, за допомогою якого воно направляється через випускне вікно корпусу 3 в патрубок 8 для виведення дрібної фракції. Крупна і дрібна фракції, які не виділилися на першому решеті, поступають на наступне, де операція повторюється. Компоненти дрібної фракції, які виділились на всіх решетах, об'єднуються і виводяться із сепаратора через патрубки 8. Як відмічає сам автор [5], при збільшенні швидкості зерна, що є основним фактором підвищення продуктивності, погіршуються умови просіювання, знижується ефективність виділення дрібної фракції.

Науково-виробничим об'єднанням "Ексімер" в 1998 році освоєно випуск нового зерноочисника СЗГ-25 [60], в якому процес очищення від домішок здійснюється при гравітаційному (самоточному) русі зернової суміші по нерухомих решетах. Робочий процес гравітаційного зерноочисника здійснюється наступним чином: зерновий матеріал, який підлягає очищенню, подається в колонку зверху, і під дією власної ваги проходить через колонку, де очищується від крупних і дрібних домішок,

які виводяться в нижній частині колонки окремо від чистого зерна (рис. 1.5).

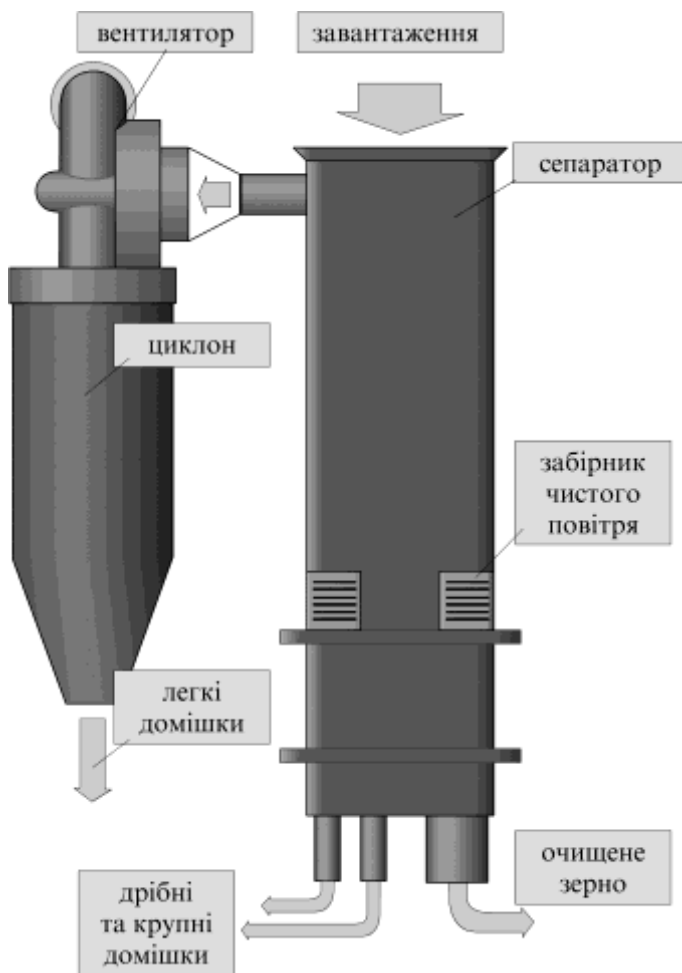


Рис. 1.5. Принципова схема зерноочисника ЗГ-25

Самопотокові сепаратори не знайшли широкого розповсюдження в зернопереробних галузях промисловості, однак при використанні процесу розділення за допомогою клиноподібних повздовжніх отворів та

використання силових полів великої напруженості, перед цим класом машин відкриваються широкі перспективи при усуненні відмічених та інших недоліків.

Один із шляхів вирішення задачі пов'язаний з використанням для сепарації інерційних силових полів, які дозволяють інтенсифікувати просіюваність зерна за рахунок використання відцентрових сил [3, 7, 15, 20, 21, 23, 37, 66, 68, 70, 73, 118].

Для інтенсифікації процесу сепарації за допомогою відцентрових сил вперше були використані обертові решета. Тут перш за все необхідно назвати циліндричні, конічні і лопатеві центрифуги. Із центрифугами з конічним ротором межують відцентрові сепаратори з криволінійною поверхнею ротора (параболоїд або гіперболоїд обертання). Із інших принципових ознак відцентрових сепараторів необхідно назвати орієнтацію осі обертання ротора по відношенню до напрямку гравітаційного поля.

Відомі сепаратори, у яких ротори перерахованих типів обертаються відносно вертикальної [3, 7, 30, 31, 37, 43, 81, 90, 93, 94, 101, 103, 104, 118] або горизонтальної осі [15, 30, 33, 38, 50, 70, 90, 93, 95, 108], а також сепаратори з конічними, циліндричними і дисковими роторами, які обертаються відносно похилої осі [3, 11, 15, 27, 33, 50, 64, 66, 80, 99].

Тихохідні циліндричні решета мало розповсюджені. Вони використовувались в основному в трієрах, а також в деяких сепараторах комбикормових заводів для очищення окремих видів сировини. За кордоном вони використовуються як для попереднього очищення в скальператорах (фірма Саймон-Картер, США), так і для кінцевих операцій розділення зерна за розмірами на підсівних і сортувальних решетах фірм: Хейд в Австрії, Шуле в Німеччині, Моро і Сокам у Франції, Пенней і Партер в Англії, Хоуз і Сьюперіор у США та ін. [17, 44, 94, 115, 117].

Головною причиною низької продуктивності існуючих циліндричних решіт даного типу є їх тихохідність і, як наслідок, неефективне використання конструктивної площі. За даними авторів робіт [33, 90, 95], в тихохідних циліндричних решетах в безпосередньому контакті із зерном одночасно знаходиться від $1/5$ до $1/3$ частини їх конструктивної площі, в той час як конструктивна площа плоских решіт використовується майже повністю.

Важливими перевагами швидкообертових циліндричних решіт (ШЦР) є те, що завдяки використанню в них додаткових відцентрових сил інерції, вони дозволяють підняти процес сепарації на новий, більш високий рівень і значно збільшити його ефективність.

Можливість використання в ШЦР інерційних силових полів для інтенсифікації процесу сепарації, які значно перевищують гравітаційні, постійно привертала увагу багатьох дослідників і практиків [3, 11, 15, 20, 21, 22, 43, 44, 50, 93, 97, 101, та ін.].

На відміну від гравітаційних сил, під дією яких протікає сепарація на плоских і тихохідних циліндричних решетах, відцентрові сили інерції в ШЦР можна регулювати в широких межах. Це дає можливість більш ефективно керувати процесом сепарації з метою його подальшої інтенсифікації. Із цього випливає, що такі решета заслуговують особливої уваги і вимагають свого подальшого вивчення і вдосконалення.

В циліндричних сепараторах з вертикальною віссю обертання зерно направляється на розподільний диск, встановлений у верхній частині ротора центрифуги (рис. 1.6 а). Під дією відцентрових і коріолісових сил інерції зерно подається на поверхню решета і рухається по ньому зверху вниз під дією сили тяжіння. Виділення прохідної фракції через отвори ротора відбувається під дією відцентрових сил. В конічних відцентрових сепараторах (рис. 1.6 б) зерно направляється в нижню частину

центрифуги, звідки за допомогою розподільного пристрою подається на перфорований ротор. Далі зерно рухається по решету знизу вгору під дією складової відцентрової сили, спрямованої вздовж дотичної конуса. Виділення прохідної фракції відбувається при цьому в результаті дії складової відцентрової сили, яка спрямована перпендикулярно до решета.

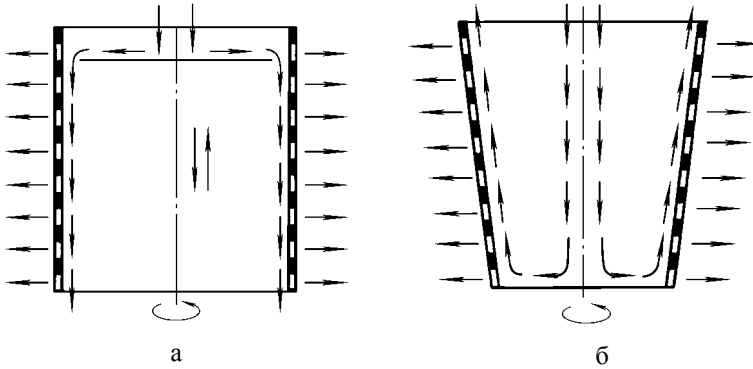


Рис. 2.6. Схема руху матеріалу в центрифугі:

а – циліндричній; б – конічній

Не дивлячись на те, що у віброцентрифугах з вертикальним циліндричним ротором напруженість відцентрового поля висока і через граничне значення практично нерегульована, при деякому доопрацюванні конструкції такі машини можуть перевищувати за своїми показниками гравітаційні сепаратори аналогічного призначення.

Дослідження інтенсифікації робочого процесу таких решіт забезпечили створення принципово нових зернових сепараторів вібровідцентрової дії. Науково-дослідні роботи по створенню таких сепараторів виконані в УНДІМЕСГі [35, 36, 37]. В нових сепараторах використане блоково-модульне узгодження робочих органів у формі окремих автономних блоків, кожний із яких забезпечує визначений цикл сепарації. В якості базової моделі параметричного ряду універсальних

вібровідцентрових зернових сепараторів створений сепаратор А1-БЦС-100 [37], (рис. 1.7).

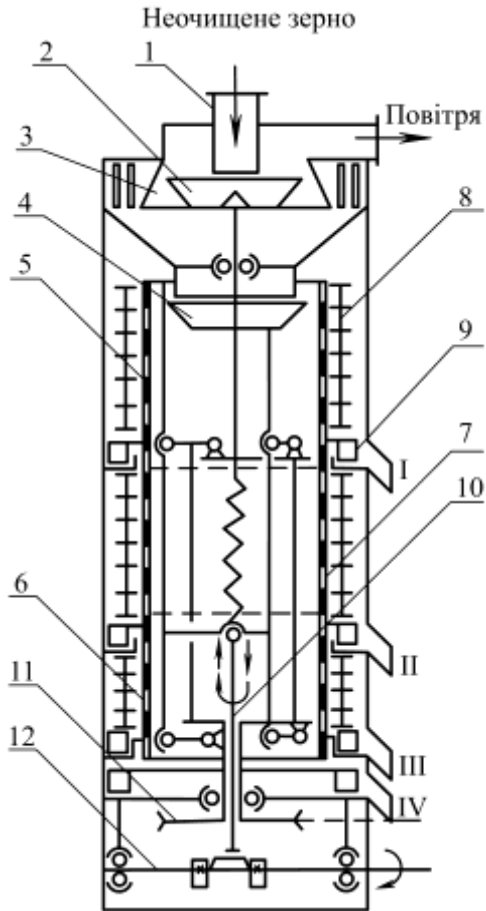


Рис. 1.7. Циліндричний блок Р-8БЦС-25 сепаратора А1-БЦС-100: 1 – завантажувальний пристрій; 2 – розкидач; 3 – пневмосепаруючий канал; 4 – розподільник; 5, 6, 7 – решета; 8 – щітки для очищення решета; 9 – пристрій для виведення фракцій; 10 – шатун; 11 – привод ротора; 12 – вібратор; I – дрібні домішки; II – чисте зерно; III – зернові відходи; IV – крупні домішки

Він складається із чотирьох блоків, які працюють незалежно один від одного. Зерно в них подається на розподільний диск, який знаходиться в верхній частині решітчастого циліндра. Під дією відцентрових сил зерно рівномірно розподіляється по периметру диска і направляється на розподільну поверхню решітчастого циліндра, а під дією вібрації ротора зерно переміщується вниз. При цьому проходять частки, розміри яких менше розмірів отворів, під дією відцентрових сил інерції виділяються через отвори циліндра і поступають в приймальники фракцій. Звідси отримані фракції направляються до вивантажувального патрубку і виводяться із машини. Послідовне встановлення циліндричних решіт з різними розмірами отворів дозволяє розділити вихідну зернову суміш на декілька фракцій.

Потужність електродвигунів, встановлених в сепараторі А1-БЦС-100, становить 7,4 кВт без приводу вентиляторів, маса машини 4800 кг. За даними Є.С. Гончарова [35, 36, 37] використання високопродуктивних вібровідцентрових сепараторів забезпечує суттєві зниження енергетичних і матеріальних ресурсів: питомі витрати електроенергії і матеріалів знижуються на 20–30 %, необхідність в площах виробничих приміщень зменшується в 2–4 рази порівняно з сепараторами, які мають плоскі решета.

Одним із недоліків вібровідцентрових сепараторів є наявність коливальних частин, які мають достатньо велику масу. Сили інерції, які при цьому виникають, передаються на фундамент (раму) і служать джерелом додаткових напружень в вузлах машин, що є причиною шуму і т.п. Необхідно відмітити, що складність і низька надійність приводу відцентрових машин, а також проблема підвищення зносостійкості робочих органів викликає значні труднощі при їх експлуатації.

Розроблені конструкції швидкообертових циліндричних решіт з нерухомими внутрішніми пристроями, яким присвячені роботи М.Н. Летошнева, Р.Г. Муллаянова, С.М. Григор'єва, М.В. Кирєєва, Л.І. Єрошенко та ін. Характерною особливістю таких решіт є те, що в них для сепарації використовується відносний рух, який має місце при розгоні зерна після подачі на швидкообертову циліндричну поверхню. На рис. 1.8 приведено решето 1 з нерухомими внутрішніми пристроями, виконаними у вигляді направляючої скатної дошки 2 і щитка 3, які забезпечують можливість збільшення швидкості обертання решітчастого циліндра. Таке решето має більш високу питому продуктивність ніж звичайні тихохідні решета.

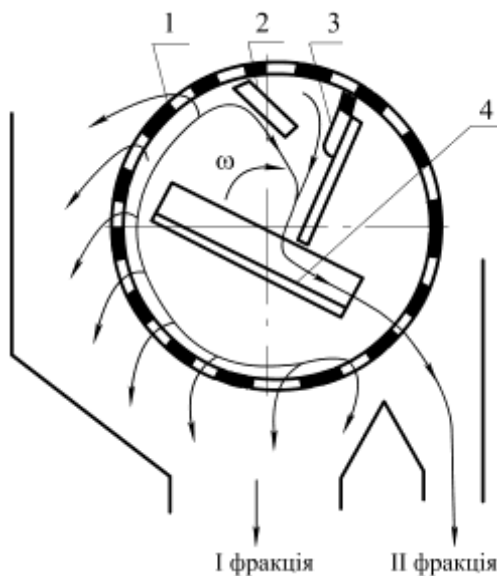


Рис. 1.8. Решето з нерухомими внутрішніми пристроями:

1 – решето; 2 – направляюча скатна дошка; 3 – щиток

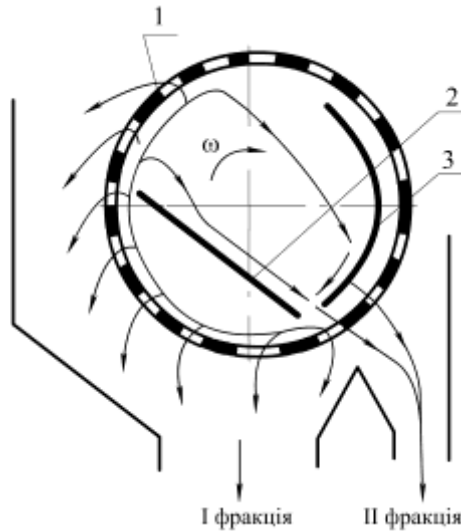


Рис. 1.9. Схема ШЦР конструкції ЛСПГ:

1 – решето; 2 – зернознімальник; 3 – щітка; 4 – вивідний лоток

Значно ефективніше працює решето з нерухомими внутрішніми пристроями, приведені на рис. 1.9, яке обладнане додатково зернознімальником 2 і щіткою 3. Експериментальні дослідження, такого решета проведені М.В. Кирєєвим, показали, що його питома продуктивність при діаметрі решітчастого циліндра 0,4 м при очищенні зерна пшениці з повнотою її розділення $\varepsilon = 0,7$ досягає значень $8000 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год}$, що в 6–7 разів перевищує відповідні показники для плоских решіт. Але складність приводу самої машини і очищення решіт, можливість травмування зерна внутрішніми пристроями не дали можливості широкого використання сепараторів даної конструкції.

Теоретичний і практичний інтерес мають роботи М.Є. Авдєєва, присвячені лопатевим сепараторам [5, 7, 109]. На основі розроблених ним вимог до моделі ідеального сепаратора [4] розроблений інерційний

сепаратор ДКС-1 [109], (рис. 1.10). Однією із особливостей такого інерційного сепаратора є реалізація в ньому принципу розділення сумішей на фракції за допомогою клиноподібних повздовжніх отворів.

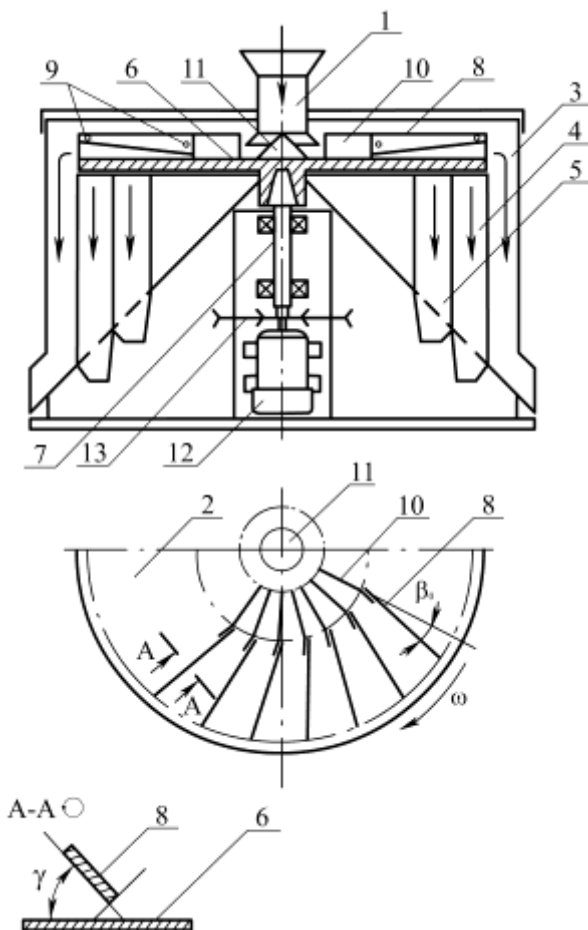


Рис. 1.10. Принципова схема інерційного сепаратора ДКС-1

Сепаратор ДКС-1 складається із завантажувального пристрою 1, лопатевого ротора 2 і приймальників фракцій 3, 4, 5. В лопатевому роторі на горизонтальному диску 6, який встановлений на вертикальному валу 7

під кутом β_0 до радіального напрямку, розміщені розподільні лопаті 8. З диском вони створюють отвори, висота яких збільшується від центра до периферії ротора і може регулюватися за допомогою гвинтів 9. Розподільні лопаті з поверхнею диска складають кут γ . Перед розподільними лопатями закріплені розгінні ділянки 10, які притискуються до подільника 11. За розподільними лопатями встановлені патрубки для виведення прохідної і сходової фракцій. Вертикальний вал ротора приводиться в рух від електродвигуна 12 за допомогою клинопасової передачі 13.

Зерно через завантажувальний пристрій подається на подільник 11 ротора 2, який обертається. Рівномірно розподілене зерно відкидається на розгінні ділянки 10 лопатей 8. При русі по розгінній ділянці під дією відцентрових сил інерції частки зерна досягають необхідної швидкості і потрапляють на розподільну лопать. Під дією сили тяжіння, коріолісової сили інерції і нормальної складової відцентрової сили інерції частки зерна рухаються вздовж отворів і виділяються в тому місці, де їх товщина відповідає ширині отворів. Проходові фракції, отримані на різній довжині лопаті, і сходові фракції виводяться у відповідні приймальники 3, 4, 5. Клиноподібна форма отворів виключає можливість їх забивання частками з розмірами близькими до розмірів отворів. Інерційний сепаратор даного типу має практично необмежену продуктивність за рахунок великої швидкості (10 м/с і вище) руху зерна. Необхідна ефективність досягається раціональним використанням всіх складових регульованого силового поля, які забезпечують найбільш сприятливі умови попадання і виділення зерна в клиноподібних отворах. Універсальність інерційного сепаратора полягає в можливості регулювання гранулометричного складу фракцій, а також можливості переходу на інше зерно без заміни робочого органу.

Однак, як відмічає сам автор [5], при виборі кінематичного режиму процесу роботи інерційного сепаратора, крім ефективності сепарації, суттєве значення має механічна дія на зерно, що приводить до його травмування і погіршення лежкості. Використання такого сепаратора для багатофракційного розділення з метою отримання двох і більше проходових фракцій, ускладнює виведення розділених компонентів і, відповідно, конструкцію машини.

Проведений огляд решітчастих сепараторів для очищення і сортування зерна показав, що за довгий шлях їх вдосконалення і розвитку створено багато різних зразків робочих органів, які в залежності від рівня вдосконаленості і технологічної ефективності можна умовно віднести до декількох поколінь (рис. 1.11).

До першого покоління необхідно віднести нерухомі плоскі решета, які встановлюються під деяким кутом до горизонту, найбільш прості за конструкцією, не мають пристроїв для очищення. Вони характеризуються низькою питомою продуктивністю і не мають промислової перспективи.

До другого покоління відносяться тихохідні решета барабанного типу, які мають більш високу питому продуктивність.

Найбільшого розповсюдження на практиці в даний час отримали сепаруючі робочі органи третього покоління. До них відносяться гравітаційні плоскорешічасті сепаратори, які здійснюють коливний чи вібраційний рух різного виду, мають пристрої для очищення робочих отворів. Їх питома продуктивність в три і більше разів вища, ніж у решіт другого покоління.

Продуктивні можливості всіх приведених вище решітчастих сепараторів обмежені і не задовольняють сучасних вимог до них. Ефективність їх роботи визначається дією поля пасивних гравітаційних

сил, які не дозволяють управляти і інтенсифікувати проходження процесу сепарації зерна.

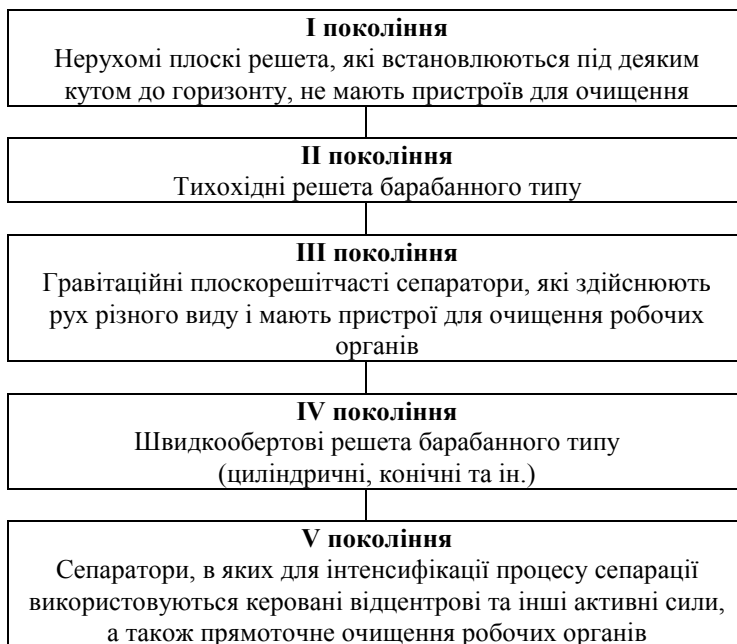


Рис.1.11. Етапи розвитку зерноочисних машин

Використання активних силових полів для інтенсифікації процесу сепарації сипких сумішей на решетах реалізовано в сепараторах четвертого покоління. До них відносяться швидкообертові решета барабанного типу (циліндричні, конічні та ін.). Їх продуктивні можливості за питомими навантаженнями на одиницю робочої поверхні решета в 3-5 разів вищі, ніж у третього покоління.

Однак, внаслідок складності будови робочих органів, недостатньої надійності технологічного процесу і окремих елементів конструкції, значного пошкодження зерна та інших причин, ці робочі органи поки що не знайшли широкого практичного використання. Перспективи їх

використання багато в чому залежать від ефективності їх вдосконалення в напрямку усунення відмічених недоліків. Суттєве підвищення технологічної ефективності цих сепараторів поки не забезпечує відповідного підвищення їх економічної ефективності.

До п'ятого покоління можна віднести сепаруючі робочі органи, в яких для інтенсифікації процесу сепарації використовуються керовані відцентрові сили, а також прямоточне самоочищення отворів решіт. Їх питома продуктивність в десятки разів перевищує відповідні показники робочих органів третього покоління.

Таким чином, із приведеного огляду решітчастих сепараторів для очищення і сортування зерна, а також із співставлення головних показників їх роботи можна зробити наступні висновки:

1. Найбільш розповсюджені в даний час плоскорешітчасті коливні зерноочисні машини мають ряд характерних недоліків, до яких необхідно віднести складність очищення отворів, значні габаритні розміри, високі питомі показники енерго- і матеріалоспоживання. Це в свою чергу, є однією із основних проблем даного класу машин на шляху подальшої інтенсифікації процесу сепарації.

2. На протязі свого розвитку гравітаційні сепаратори традиційної схеми очищення з перфорованими розподільними поверхнями практично досягли межі свого вдосконалення. Роботи, які проводяться останнім часом по подальшій інтенсифікації процесів, що в них проходять, не торкаються їх принципу дії, а направлені тільки до більш детальної оптимізації режимних параметрів і удосконалення окремих вузлів приводу. В силу перелікованих вище причин зниження показників енерго- і матеріалоємності плоскорешітчастих сепараторів дуже утруднюється.

3. Продуктивність зерноочисних машин з традиційними сепаруючими робочими органами може бути підвищена в основному за

рахунок збільшення їх розмірів. Однак цей шлях не завжди ефективний, бо збільшення розмірів сепаруючих робочих органів приводить до порушення оптимальних технологічних режимів роботи, збільшення питомої металоємності та інших негативних наслідків.

4. Багаторічний досвід експлуатації плоскорешітчастих сепараторів виявив їх основний недолік – низьку питому продуктивність. Підвищити її будь-якими інтенсивними заходами (зміною періоду, амплітуди коливання або кута нахилу решета) неможливо, оскільки сепарація здійснюється під дією гравітаційних сил.

5. Головним напрямком подальшого підвищення ефективності сепарації є вдосконалення її на основі використання нових, більш прогресивних робочих органів, які дозволяють підняти технічний рівень сепаруючих машин у відповідності з сучасними вимогами до зерноочисних і сортувальних машин.

1.2. Аналіз основних результатів теоретичних досліджень сепарації зерна на решетах

Вивченню процесів сепарації сипких матеріалів на решітчастих сепараторах під дією інерційних сил присвячено багато робіт як в області сільськогосподарської техніки, так і в інших галузях, пов'язаних з виробництвом та переробкою сипких матеріалів в гірничодобувній, харчовій, комбікормовій та ін. [4, 5, 12, 19, 24, 29, 32, 35, 38, 39, 42, 45, 67, 77, 89, 90, 94, 98, та ін.].

Встановлено, що процес решітчастої сепарації складається із двох фаз, які протікають одночасно і безперервно. В першій фазі, яка є підготовчою, проходить самосортування суміші, тобто перерозподіл її фракцій в сипкому шарі. Частки, які мають менші розміри, більшу густину та менше значення коефіцієнта внутрішнього тертя, переміщуються із

верхніх шарів у нижні до поверхні решета. Інтенсивність і час процесу самосортування визначають: товщина шару зерна, ступінь неоднорідності його геометричних ознак; фізико-механічні властивості; умови динамічної дії робочого органу. Друга фаза процесу полягає у проходженні часток зерна крізь отвори решета, що можливо тільки при наявності їх відносного руху. Інтенсивність виділення проходових часток через отвори решета залежить в першу чергу від співвідношення їх розмірів, величини відносної швидкості, а також величини сил, які діють на них. Із аналізу умов проходження часток випливає, що їх виділення в значній мірі визначається характером руху зерна.

Важливою характеристикою процесу сепарації є швидкість руху зерна і нормальний його тиск на решето. Від швидкості руху зерна залежить продуктивність сепаратора, а від нормального тиску якість його роботи. Підвищення швидкості і нормального тиску більше тих, які можливі в гравітаційних сепараторах, і послужило причиною появи відцентрових сепараторів. Відомі відцентрові сепаратори за виявленими тенденціями і характером зміни нормального тиску на решето можуть бути розділені на три групи, у яких при русі зерна до виходу із сепаратора швидкість і питомий тиск, відповідно, зменшуються, залишаються постійними і збільшуються.

До першої групи відносяться центрифуги з конічним і параболічним ротором, які обертаються відносно вертикальної осі. Загальною тенденцією для них є зниження нормального тиску при підвищенні швидкості руху зерна, що необхідно визнати їх недоліком. Хоч зміною параметрів процесу і можна досягнути зворотної тенденції, однак це приводить до ускладнення конструкції.

До другої групи відносяться віброцентрифуги з циліндричним ротором, які обертаються відносно вертикальної осі. Вибором параметрів

таких центрифуг можна отримати режими знакозмінного прямолінійного руху зерна вздовж дотичної до ротора, при яких середня швидкість і нормальний тиск залишаються постійними. Завдяки цьому можна підвищити ефективність сепарації збільшенням довжини ротора. Поряд з перевагами у циліндричних центрифуг присутні недоліки: складність конструкції, яка обумовлена наявністю віброприводу; низька швидкість зерна і обмежена величина фактора розділення; труднощі очищення отворів ротора, які обумовлені одночасним його обертанням і поступальними вібраціями.

До третьої групи, для якої характерне збільшення нормального тиску по мірі руху зерна до виходу із сепаратора, можуть бути віднесені лопатеві центрифуги з вертикальною віссю обертання. Однак, у відомих типах лопатевих центрифуг збільшення питомого тиску обумовлено підвищенням швидкості, що не дозволяє підвищувати інтенсивність сепарації при обмеженій довжині решіт.

Для оцінки ефективності режимів відцентрової сепарації використовується критерій Фруда [95]

$$F_r = \frac{\omega^2 R}{g}, \quad (1.1)$$

де ω – кутова швидкість; R – радіус обертання розподільної поверхні; g – прискорення вільного падіння.

Найбільшу інформаційну цінність критерій Фруда F_r має для центрифуг з циліндричним ротором, тому що відображає фізичну суть процесу, в якому виділення зерна через отвори решета проходить під дією відцентрової сили. Збільшенню критерію Фруда та підвищенню ефективності сепарації сприяє збільшення відцентрової сили інерції

$$F = m\omega^2 R, \quad (m - \text{маса частки зерна}).$$

В центрифугах з циліндричним ротором, який обертається навколо вертикальної осі, відцентрові сили використовуються тільки для покращання умов виділення прохідної фракції, а переміщення зерна проходить під дією сили тяжіння (рис.1.11 а). Граничне значення кутової швидкості циліндричного ротора ω визначається із умови рівноваги системи сил, які діють на частку в напрямку дотичної до циліндра (рис.1.11 а)

$$P - T_r = 0,$$

де P – сила тяжіння; T_r – проекція сили тертя на напрямок дотичної до циліндра.

Відносний рух частки відсутній у випадку

$$T_r = T = fN,$$

де f – коефіцієнт тертя по поверхні ротора; N – сила нормальної реакції ротора ($N = F = mR\omega^2$, де R – радіус ротора).

Граничне значення кутової швидкості

$$\omega^* = \sqrt{\frac{g}{fR}}. \quad (1.2)$$

При $\omega > \omega^*$ відносний рух зерна по поверхні ротора швидко затухає, що призводить до порушення сепарації.

В циліндричних центрифугах фактор розділення не може перевищувати величини

$$F_r = \frac{1}{f}. \quad (1.3)$$

В центрифугах з конічним ротором (рис.1.12 б) відцентрові сили використовуються для інтенсифікації як переміщення зерна, так і

виділення прохідної фракції. В конічних центрифугах не вводять обмежень (1.3), однак граничне значення коефіцієнта тертя зерна повинно бути узгоджене з кутом Θ . Умова руху частки вгору (рис. 1.12 б)

$$\operatorname{tg} \Theta \geq \frac{f R \omega^2 + q}{R \omega^2 - f q}. \quad (1.4)$$

Умова (1.4) вводить обмеження на можливість розділення зерна з різними коефіцієнтами тертя, бо сепаратор в цьому випадку повинен мати змінні решета з різними кутами при вершині конуса. Це приводить до ускладнення конструкції такого сепаратора.

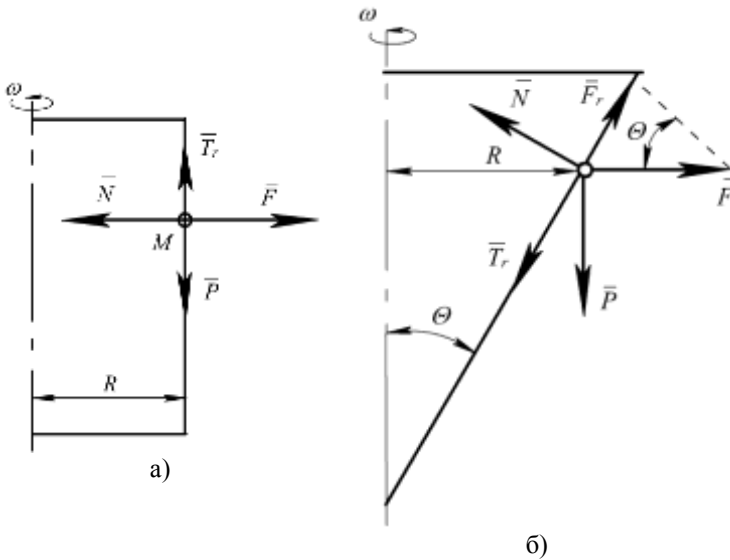


Рис.1.12. Схема до визначення умов руху частки до виходу із центрифуги сепаратора: а – циліндричній; б – конічний

Аналіз руху матеріальної точки по внутрішній поверхні ШЦР викладено в ряді робіт [10, 11, 12, 13, 15, 16, 17] та ін. Досвід показує, що основні труднощі створення працездатних швидкообертових циліндричних решіт полягає в забезпеченні стійкого відносного руху

зерна по робочій поверхні решета. При роботі циліндричних барабанів і решіт на високих режимах зерно, яке надходить на робочу поверхню, притискається відцентровими силами до циліндра. Тому використання більш високих режимів для роботи циліндричних решіт можливе тільки при умові застосування додаткових пристроїв, які змінюють відповідним чином або рух зерна у внутрішній частині решета, або рух самого решета за рахунок безперервної зміни величини абсолютної швидкості. Встановлення додаткових пристроїв, як правило, призводить до ускладнення конструкції сепаратора, підвищення його металоємності, травмування зерна та інших негативних наслідків.

Аналіз теоретичних досліджень показує, що дослідження руху часток на решетах, отвори яких розширюються в бік руху зерна, відсутні. Сучасні дослідження процесу інерційно-гравітаційної сепарації зерна виконані для різних типів сепараторів з традиційними перфорованими решетами. Поява нових технічних рішень і суттєва залежність характеристик процесу від конструктивних особливостей сепаратора обумовлює необхідність проведення додаткових теоретичних досліджень.

3. Обґрунтування перспективного напрямку сепарації зерна на решетах з клиноподібною формою отворів

Для вибору оптимальної технологічної схеми решітчастого сепарування зерна і конструкції решета розглянемо вимоги до моделі “ідеального сепаратора”, які сформульовані М.Є. Авдєєвим [4]. Практична їх цінність полягає в тому, що вони дозволяють на ранній стадії проектування здійснювати цілеспрямований пошук перспективних технічних рішень сепаруючих машин.

Можливість досягнення будь-якої швидкості зерна, і як наслідок, необмеженої продуктивності, в повній мірі виконується в конічних і

лопатевих центрифугах, в яких переміщення зерна відбувається під дією відцентрових сил інерції. Підвищення кутової швидкості ротора приводить до збільшення сил інерції і швидкості зерна.

Ймовірність попадання часток в отвори решітчастої поверхні підвищується при умові безвідриного руху зерна по ній. Такий рух забезпечується в конічних і циліндричних сепараторах завдяки наявності складової відцентрового силового поля, що діє на частку перпендикулярно до розподільної поверхні з силою, яка в десятки разів перевищує її силу тяжіння.

Другим фактором підвищення ймовірності проходження часток є їх орієнтування над отворами. Для цього необхідний зв'язок, який обмежує обертання частки відносно власних осей і її здатність переміщуватися безпосередньо над отвором. Це виконується на струнних та гофрованих решетах.

Рішення проблеми підвищення ймовірності виділення проходових часток через отвори розподільної поверхні досягається узгодженням сили, прикладеної до частки перпендикулярно площині отвору решета, з її швидкістю. При цьому товщина розподільної поверхні повинна бути дуже малою, а довжина — необмеженою. Перша частина цієї вимоги виконується за рахунок стабілізації швидкості переміщення в лопатевих відцентрових сепараторах з криволінійною формою розподільної поверхні. Другій частині вимоги відповідають сепаратори, розподільна поверхня яких складається із елементів, що мають необмежену довжину. У цьому випадку довжина отвору, створеного сусідніми елементами, значно перевищує розмір часток зерна, і її умовно можна вважати безкінцевою. Ідеальне рішення проблеми очищення розподільної поверхні відображене в сепараторах, які мають решета з повздовжніми отворами, що розширюються в бік руху зерна.

Ідеальний сепаратор не повинен споживати енергії більше тої, яка необхідна для проходження процесу сепарації. Цій умові відповідають самопотокові решітчасті сепаратори.

Проведений аналіз засобів для сепарації показує, що в ході вдосконалення окремих вузлів, оптимізації режимних і конструктивних параметрів сепаруючих машин, енергоємність процесів сепарації сипких матеріалів не тільки не знижується на протязі десятиліть, але і має тенденцію до підвищення. Таке положення в значній мірі обумовлено тим, що вдосконалення сепаруючих машин не торкається принципових особливостей їх роботи. В характерних типах решітчастих сепараторів енергія витрачається як на здійснення окремих стадій процесу сепарації, так і на функціонування сепаратора як машини в цілому.

Для оцінки ступеня ефективності використання енергії, яка підводиться до сепаратора, розглянемо рис. 1.13. Необхідність операцій і стадій, об'єднаних в четверту групу, обумовлена використанням решітчастих сепараторів з фіксованим розміром отворів. Виходячи із цього, зерно повинно безперервно перемішуватися і підкидатися решетом з метою підвищення ймовірності попадання часток в отвори. З іншого боку, по цій причині частки, з розмірами близькими до розмірів отворів, застрягають в отворах решета і погіршують виділення проходових часток. В свою чергу, забивання отворів такими частками вимагає встановлення в сепараторах спеціальних пристроїв для очищення розподільних поверхонь.

При використанні решіт з клиноподібними повздовжніми отворами, зерно рухається вздовж них у напрямку їх розширення, і виділення проходових часток відбувається в тій частині, де їх ширина перевищує розмір часток. При русі вздовж отворів зерно не відривається від решета, тому ймовірність виділення проходових часток в отвори достатньо висока,

і в цьому випадку немає необхідності підкидати зерно для збільшення числа спроб попадання в отвори. Таким чином, використання розподільних поверхонь з клиноподібними отворами дозволяє виключити операції IV, V, VI (рис.1.13), що обумовлює значне зниження енергоємності процесу.

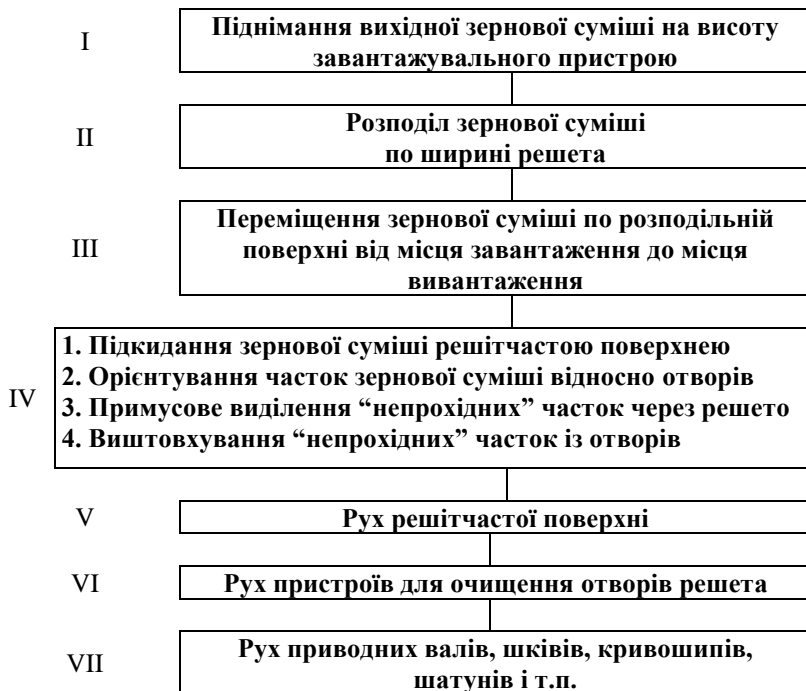


Рис. 1.13. Операції і стадії процесу сепарації,
які потребують енергетичних витрат

В силу принципової різниці характеру динамічної взаємодії зерна з решетом, яке має клиноподібні повздовжні отвори, витрати енергії на переміщення по ньому зерна значно нижчі порівняно з традиційними решетами. Крім того, допустиме питоме навантаження на одиницю площі такого решета в декілька разів вище, ніж для звичайних решіт. За даними

[87] енерговитрати на роботу сепаратора А1-ДПИ перевищують енерговитрати на процес сепарації майже в 20 разів. В інерційному сепараторі, який відрізняється низьким енергоспоживанням [109] тільки 5% енергії, яка витрачається на роботу сепаратора, використовується для виконання операцій розділення зерна на фракції. В сепараторах традиційної схеми коефіцієнт використання енергії в силу приведених раніше причин ще нижче і за орієнтовними оцінками [16, 40, 63, 69, 76] складає 1,5-2%.

Однак ідеальний сепаратор не повинен споживати енергії більше тої, яка необхідна для здійснення безпосередньо процесу сепарації. Проведений з цих позицій аналіз дозволив сформулювати і поставити для реального вирішення задачу усунення непродуктивних витрат енергії при здійсненні процесів сепарації сипких матеріалів. Із приведеного раніше переліку операцій і стадій, на виконання яких витрачається енергія, видно що при використанні решіт з клиноподібними повздовжніми отворами для досягнення поставленої мети принципово необхідними є тільки перші три: піднімання вихідного зерна на висоту завантажувального пристрою, його розподілення і переміщення по решету.

Проведений аналіз конструкцій сепараторів зерна та теоретичних досліджень дозволив зробити висновок про те, що для забезпечення високої ефективності сепарації решітчастий сепаратор повинен мати криволінійну поверхню з повздовжніми отворами нескінченної довжини, які розширюються в бік руху зерна.

У більшості конструкцій сепараторів відносний рух зерна забезпечується рухом розподільної поверхні, що в багатьох випадках не сприяє зниженню енерговитрат на процес сепарації. Із приведеного аналізу можна зробити висновок, що відмічених недоліків можна уникнути, якщо решето встановити нерухомо, а рух зерна забезпечити

гравітаційними силами. При цьому найбільш гостро постає задача вибору конструктивних елементів сепаратора, які забезпечують з одного боку режимні параметри процесу, при яких відсутнє заклинення часток в отворах решета, з іншого боку – забезпечення отримання проходових фракцій у відповідності з агротехнічними вимогами. При реалізації даного принципу сепарації з'являється реальна можливість зниження енергоспоживання на одиницю продукції в декілька разів. Крім того, в таких сепараторах відсутні вузли для приведення в рух решіт: шків, вали, шатуни, підшипники, рама для їх установки і т.п., внаслідок чого суттєво знижується і матеріалоемність машини, причому за рахунок найбільш трудоемних деталей.

В результаті огляду і аналізу сучасного стану техніки та теоретичних досліджень сепарації зерна на решітчастих сепараторах можна зробити наступні висновки.

Гравітаційні сепаратори традиційної схеми очищення з перфорованими решетами практично досягли межі вдосконалення. Роботи, які проводяться останнім часом по подальшій інтенсифікації процесів сепарації, не торкаються їх принципу дії, а направлені тільки до детальної оптимізації режимних параметрів і удосконалення окремих вузлів приводу.

Подальше підвищення продуктивності зерноочисних машин можна здійснювати за рахунок інтенсифікації процесів сепарації на основі нових принципів обробки зерна. Перспективи подальшої інтенсифікації пов'язані з використанням для сепарації інерційних силових полів, які дозволяють інтенсифікувати просіюваність зерна за рахунок використання відцентрових сил.

Виконаний аналіз енергії, необхідної для здійснення процесу сепарації показує, що фактичне енергоспоживання перевищує теоретичне майже в 20 разів.

Перспективний напрямок в розробці сепараторів зерна полягає в реалізації принципу розділення за допомогою решіт, які мають клиноподібні повздовжні отвори, в інерційно-гравітаційному полі без підведення енергії від зовнішніх джерел. Перспективність даного напрямку обумовлена як можливістю організації гнучких автоматизованих процесів на базі таких сепараторів, так і зниженням витрат енергії та матеріалів.

Клиноподібна форма отворів є необхідною умовою їх незабивання частками з розмірами близькими до розмірів отворів решета, обумовлює специфічні особливості характеру динамічної взаємодії зерна з розподільною поверхнею, що дозволяє інтенсифікувати процес сепарації в інерційно-гравітаційному полі.

При проведенні процесу сепарації, за допомогою решіт з клиноподібними повздовжніми отворами під дією інерційних силових полів, виникає необхідність проведення додаткових теоретичних досліджень.

На основі аналізу зерноочисних машин запропонована принципова схема інерційно-гравітаційного сепаратора, який сьогодні найбільш повно відповідає вимогам моделі “ідеального сепаратора”.

З урахуванням викладеного раніше був запропонований інерційно-гравітаційний решітчастий сепаратор, створений на основі решіт [113, 114], технологічна схема якого приведена на рис.1.14. Колосове і підсівне решета виготовлені із прутків круглого поперечного профілю, розташованих один біля одного, які створюють повздовжні отвори нескінченної довжини, що розширюються в бік руху зерна, (рис.1.15).

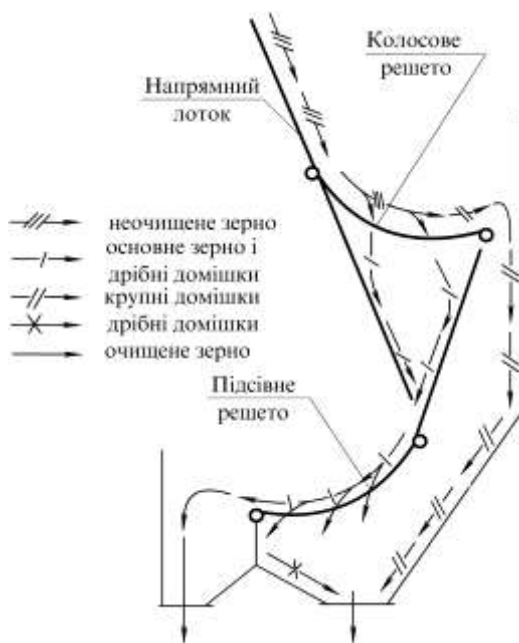


Рис.1.14. Технологічна схема запропонованого інерційно-гравітаційного сепаратора

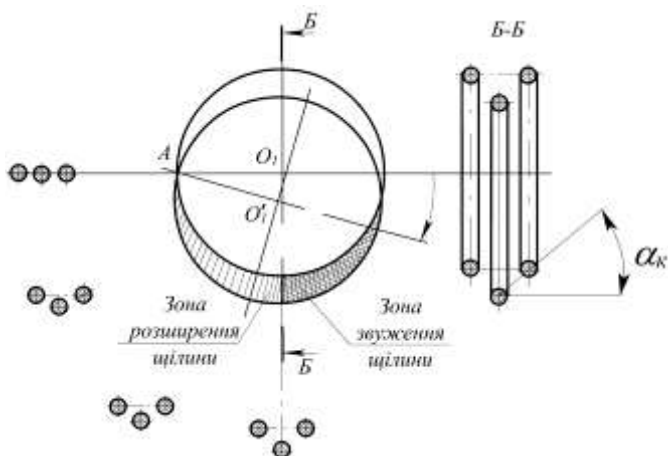


Рис.1.15. Схема до обґрунтування решіт з повздовжніми отворами, які розширюються в бік руху зерна

2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СЕПАРАЦІЇ В ІНЕРЦІЙНО-ГРАВІТАЦІЙНОМУ СЕПАРАТОРІ

2.1. Аналіз факторів, які впливають на рух зерна в сепараторі

Запропонована в попередньому розділі технологічна схема інерційно-гравітаційного решітчастого сепаратора передбачає очищення зерна від крупних і дрібних домішок, яке виконується на двох решетах (колосовому і підсівному), встановлених послідовно (рис. 1.12). Процес руху зерна на верхньому і нижньому решетах подібний, різниця лише в геометричних параметрах, які обумовлені вимогами до розділення зерна. Тому для обґрунтування їх параметрів розглянемо тільки рух на одному решеті.

На проходження процесу руху впливають такі фактори (рис. 2.1):

- параметри завантажувального пристрою: довжина S_d , ширина B_d ; кут нахилу Θ_0 , від яких залежить початкова швидкість зерна, з якою воно буде подаватися на решето;
- параметри решета: радіус R ; довжина $S = R\Theta$; кут розхилу прутків у поперечному перерізі α ; початкова b_0 і кінцева b_k ширина щілини решета; діаметр прутків d_{np} ; відхилення решета від горизонту Θ_0 .

Явища, які проходять при русі і виділенні часток через клиноподібні повздовжні отвори поверхні решета інерційно-гравітаційного сепаратора, виявляються дуже складними і залежать від ряду випадкових факторів, обумовлених численними зв'язками, накладеними на рух часток. На основі цього доцільно при розгляді досліджуваного процесу сепарації, головною особливістю якого є проведення процесу розділення за рахунок потенційних джерел енергії, описати його як за допомогою детермінованої математичної моделі, так і з використанням елементів теорії ймовірності.

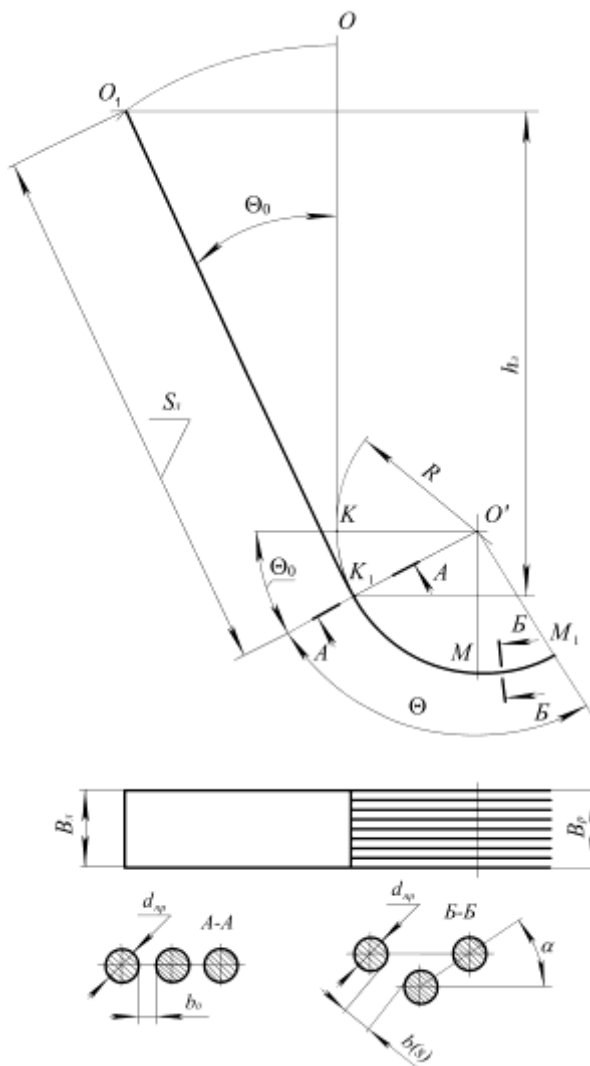


Рис. 2.1. Схема до визначення параметрів, які впливають на процес сепарації в інерційно-гравітаційному решітчастому сепараторі

Детермінований підхід до опису технологічного процесу сепарації сипучих матеріалів дозволяє визначити сприятливі режими відносного

руху часток вздовж клиноподібного отвори на основі аналізу диференційного рівняння їх руху. Однак детерміновані математичні моделі, які зв'язують основні конструктивні параметри сепараторів і фізико-механічні властивості часток, не враховують одночасного впливу на ефективність сепарації розподілу часток зерна за розмірами, навантаження і вибрану межу розділення. Залежність ефективності сепарації від випадкового збігу вказаних вище факторів створює об'єктивні передумови для їх математичного моделювання методами теорії ймовірності. Використання різними авторами теорії випадкових функцій для опису процесів стосовно сепараторів традиційної схеми з вібруючими перфорованими поверхнями підтверджує правомірність такого підходу [19, 79 та ін.].

2.2. Аналіз руху зерна в завантажувальному пристрої

В запропонованому сепараторі зерна завантажувальний пристрій (рис.2.2) являє собою шорстку похилу поверхню у вигляді лотка, яка використовується в якості робочих органів багатьох сільсько-господарських машин. Рухом сипких матеріалів по поверхнях такого типу займалися дуже багато дослідників [18, 41, 56, 61, 62 та ін.]. Встановлено, що під час руху сипких матеріалів під дією сили тяжіння швидкість їх руху можна визначити за формулою

$$V = \sqrt{2gS_{\text{л}} \left[\cos \Theta_0 - f \sin \Theta_0 \left(1 + \frac{nH}{B_{\text{л}}} \right) \right]} + V_0^2, \quad (2.1)$$

де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння; f – коефіцієнт зовнішнього тертя; n – коефіцієнт бокового тиску; H – висота шару сипкого матеріалу; $B_{\text{л}}$ – ширина лотка; V_0 – початкова швидкість.

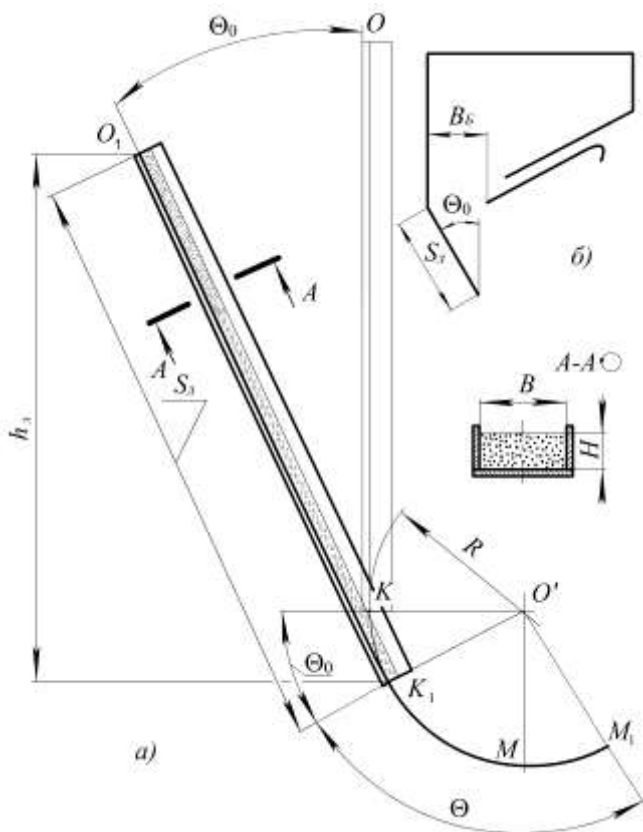


Рис. 2.2. Схема до визначення параметрів завантажувального пристрою

Формула (2.1) справедлива при швидкостях руху сипкого матеріалу не більше 2–3 м/с [62]. При більших швидкостях необхідно враховувати вплив повітряного середовища, при цьому швидкість руху визначається за формулою

$$V = \sqrt{\frac{2gS_{\text{л}} \left[\cos \Theta_0 - f \sin \Theta_0 \left(1 + \frac{nH}{B_{\text{л}}} \right) \right] + V_0^2}{1 + 2S_{\text{л}} k_n}}, \quad (2.2)$$

де k_n – коефіцієнт парусності.

Аналіз формули (2.2) показує, що із збільшенням довжини лотка S_l швидкість на початку різко збільшується (рис.2.3), а потім її ріст сповільнюється, і вона стає практично постійною.

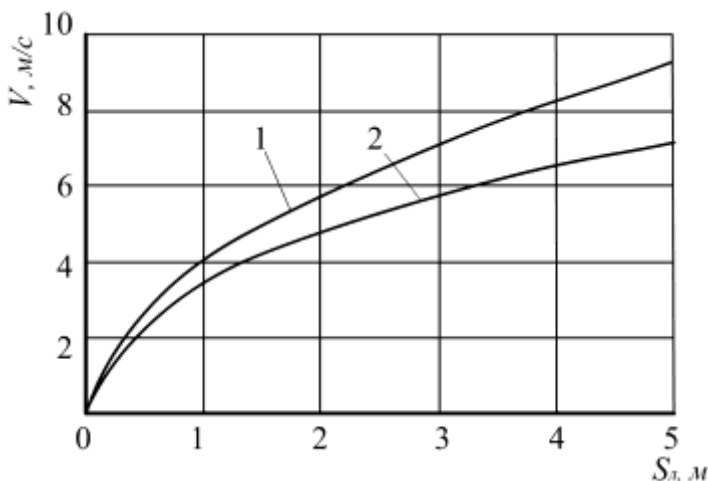


Рис. 2.3. Залежність зміни швидкості руху зерна пшениці від довжини лотка: $k_n = 0,076$, $f = 0,45$, $n = 2,25$, $H = 0,05$ м, $B_l = 1,0$ м,

$$1 - \Theta_0 = 0^0, 2 - \Theta_0 = 10^0$$

Тому, для отримання максимальних значень швидкості руху зерна немає необхідності збільшувати довжину лотка до значень, коли $S \rightarrow \infty$. Довжина шляху розгону обмежується деяким відрізком $S = S_{ep}$, після досягнення якого швидкість стабілізується на значеннях V_{max} . При довжині лотка $S_l = 1$ м можна отримати швидкість руху зерна V в межах 4 м/с, що є достатнім для проведення процесу сепарації. Для забезпечення більш високих швидкостей з метою зменшення габаритів

машини доцільно використовувати додаткові пристрої, наприклад у вигляді щітки [113].

Особливістю завантажувального пристрою в даному випадку (рис. 2.2 а) є те, що перехід в точці K на решето повинен бути плавним. Решето, виконане у вигляді дуги кола, тому необхідною умовою є те, щоб лінія нахилу завантажувального пристрою була розташована по дотичній ($O_1K_1 \perp K_1O'$). При такій умові зміна нахилу лотка буде впливати і на характер руху часток по решеті. Із аналізу формули (2.2) випливає, що максимальна швидкість сипучого матеріалу при мінімальній довжині лотка забезпечується у випадку $\Theta_0 = 0$. Однак, з іншого боку на кут Θ_0 буде впливати ширина викидного вікна бункера B_B (рис. 2.2 б). В цьому випадку Θ_0 визначаємо із виразу $\Theta_0 = \arcsin(\frac{B_B}{S_n})$, де B_B – ширина викидного вікна бункера, яка буде визначати висоту шару сипучого матеріалу, тобто ($B_B = H$).

2.3. Детермінована математична модель руху частки

2.3.1. Рух частки вздовж клиноподібного отвору

Для складання рівняння руху частки прийняті наступні допущення:

- частка рухається без перекочування і має форму еліпсоїда обертання з поперечним перерізом у вигляді круга діаметром d_e ;
- пружні властивості частки і прутків решета суттєво не впливають на процес руху;
- частки не взаємодіють одна з одною;
- коефіцієнт тертя f залишається постійним на всьому шляху переміщення частки;

– опір повітряного середовища не враховується.

Подібні допущення використовуються при вирішенні задач даного класу [3, 14, 19, 33, 72], що дозволяє спростити інженерний аналіз моделі.

Розглянемо випадок руху частки по поверхні решета, яка представляє собою дугу кола, утворену прутками опуклого профілю (рис.2.4-2.5), де Θ_0 – кут, який визначає початкове положення решета; Θ – кут, який визначає положення частки на решеті; R – радіус дуги решета; α – кут розхилу прутків у поперечному перерізі; β – кут, який визначає положення частки на поверхні решета у поперечному перерізі; d_{np} – діаметр прутків решета; d_e – еквівалентний діаметр частки. Внаслідок нерівномірного руху частки згідно з принципом Даламбера на неї будуть діяти сили інерції, направлені у напрямку протилежному відповідним прискоренням. Тангенційна сила інерції визначається рівнянням

$$C_t = m \frac{d^2 S}{dt^2} = m \frac{dV}{dt}, \quad (2.3)$$

нормальна сила інерції

$$C_n = \frac{m}{R} \left(\frac{dS}{dt} \right)^2 = \frac{mV^2}{R}. \quad (2.4)$$

де m – маса частки; V – швидкість руху частки по поверхні решета; f – коефіцієнт тертя.

Крім того, на частку будуть діяти сила тяжіння $G = mg$, нормальна реакція поверхні решета N , сила тертя $F = fN$.

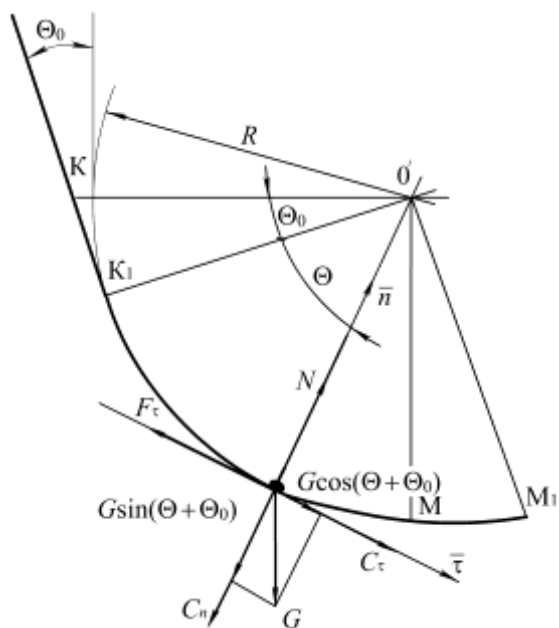


Рис. 2.4. Схема сил, які діють на частку на поверхні решета

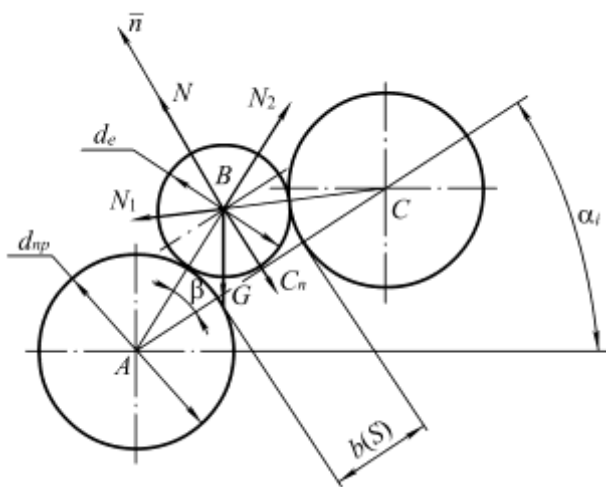


Рис. 2.5. Схема дії сил у поперечному перерізі

Спроектуємо сили, які діють на частку, на вісь τ .

$$m \frac{d^2 S}{dt^2} - F_\tau + G \cos(\Theta + \Theta_0) = 0, \quad (2.5)$$

де F_τ – проекція сил тертя на вісь τ , яку можна визначити за формулою

$$F_\tau = fN = f(N_1 + N_2), \quad (2.6)$$

де N_1, N_2 – складові сили нормальної реакції поверхні решета на першому і другому пруткові, створені силою тяжіння і відцентровою силою

$$N_1 + N_2 = mg \sin(\Theta + \Theta_0)(\cos(\alpha + \beta) + \sin(\alpha + \beta)) + m \frac{\dot{S}^2}{R}. \quad (2.7)$$

З урахуванням формули (2.7) рівняння (2.6) запишемо у вигляді:

$$F_\tau = fmg \sin(\Theta + \Theta_0)(\cos(\alpha + \beta) + \sin(\alpha + \beta)) + fm \frac{\dot{S}^2}{R}. \quad (2.8)$$

Тоді рівняння (2.5) можна записати у вигляді

$$m\ddot{S} + fmg \sin(\Theta + \Theta_0)(\cos(\alpha + \beta) + \sin(\alpha + \beta)) + mf \frac{\dot{S}^2}{R} = mg \cos(\Theta + \Theta_0). \quad (2.9)$$

Помножимо рівняння (2.9) на $\frac{1}{mR}$ і отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{\ddot{S}}{R} + f \frac{g}{R} \sin(\Theta + \Theta_0)[\cos(\alpha + \beta) + \sin(\alpha + \beta)] + \\ + f \frac{\dot{S}^2}{R} = \frac{g}{R} \cos(\Theta + \Theta_0) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Враховуючи, що $\frac{S}{R} = \Theta$, рівняння (2.10) запишемо у вигляді

$$\ddot{\Theta} = \frac{g}{R} \cos(\Theta + \Theta_0) - f \frac{g}{R} \sin(\Theta + \Theta_0) \times \\ \times (\cos(\alpha + \beta) + \sin(\alpha + \beta)) - f \dot{\Theta}^2 \quad (2.11)$$

2.3.2. Визначення ширини отвору по довжині решета

Для визначення ширини отвору решета в будь-якому перерізі розглянемо отвір, створений двома прутками (рис.2.6). В даному випадку розширення отворів буде відбуватися тільки в межах $0 < \Theta < 90^0$, що є необхідною умовою процесу сепарації і самоочищення решета, тому розглянемо тільки ділянку на довжині $0 < S < \frac{\pi R}{2}$. Ширину отвору в будь-якому перерізі можна визначити за формулою

$$b(s) = b_0 + \Delta b,$$

де Δb – приріст збільшення отвору по довжині решета.

$$\text{Із рис. 2.6: } \Delta b/S = 2(b_\kappa - b_0)/\pi R \Rightarrow \Delta b = 2S(b_\kappa - b_0)/\pi R,$$

де b_κ – ширина отвору решета в кінцевій частині.

Тоді

$$b(s) = b_0 + 2S(b_\kappa - b_0)/\pi R. \quad (2.12)$$

З урахуванням того, що $\frac{S}{R} = \Theta$ рівняння (2.12) запишемо у вигляді

$$b(s) = b_0 + 2\Theta(b_\kappa - b_0)/\pi. \quad (2.13)$$

$$\text{Із рис. 2.6 } \Delta b/S = 2(b_\kappa - b_0)/\pi R \Rightarrow \Delta b = 2S(b_\kappa - b_0)/\pi R, \text{ де } b_\kappa$$

– ширина отвору решета в кінцевій частині.

Тоді

$$b(s) = b_0 + 2S(b_\kappa - b_0)/\pi R. \quad (2.12)$$

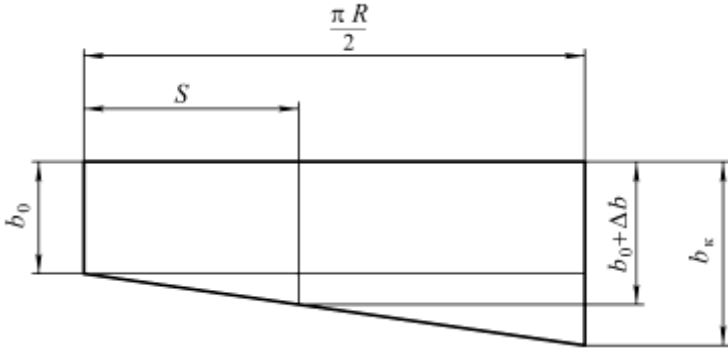


Рис. 2.6. Схема проекції отвору решета

З урахуванням того, що $\frac{S}{R} = \Theta$, рівняння (2.12) запишемо у вигляді

$$b(s) = b_0 + 2\Theta(b_\kappa - b_0)/\pi \quad (2.13)$$

2.3.3. Визначення кута розхилу прутків у вертикальній площині

Для визначення кута розхилу прутків у поперечній площині α розглянемо рис. 2.7. Тут $\alpha_i/S = 2\alpha_\kappa/\pi R$, де α_i – значення кута розхилу прутків в будь-якому поперечному перерізі; α_κ – значення кута розхилу прутків в поперечному перерізі в кінцевій частині.

Звідси

$$\alpha_i = \frac{2\alpha_\kappa}{\pi} \Theta \quad (2.14)$$

Позначимо $2\alpha_\kappa/\pi = k$. Тоді формулу (2.14) можна записати таким чином

$$\alpha_i = k\Theta. \quad (2.15)$$

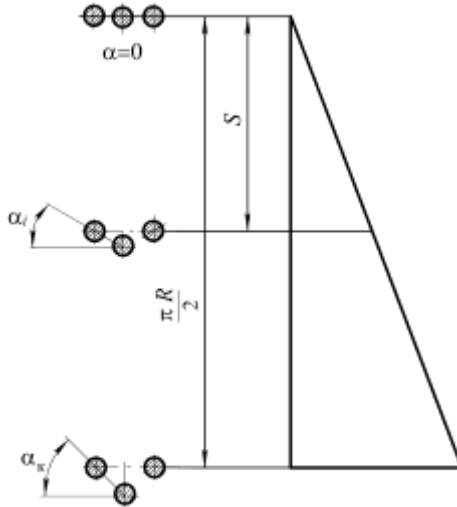


Рис. 2.7. Схема до визначення кута розхилу прутків у поперечній площині на різних ділянках решета

2.3.4. Визначення кута, який визначає положення частки на решеті у поперечному перерізі

Розглянемо $\triangle ABC$ (рис. 2.5). Кут β створений прямими AB і AC , які з'єднують центри прутків і частки. Із рисунка видно, що

$$\cos \beta = \frac{r + b(s)/2}{r_e + r} = \frac{r + b_0/2 + \Theta(b_\kappa - b_0)/\pi}{r_e + r}, \quad (2.16)$$

де r – радіус прутків решета; r_e – еквівалентний радіус частки.

Позначимо $\frac{r + b_0/2}{r_e + r} = a$; $\frac{b_\kappa - b_0}{\pi(r_0 + r)} = c$, тоді формулу (2.16)

можна записати у вигляді $\cos \beta = a + c\Theta$, очевидно що

$\sin \beta = \sqrt{1 - (a + c\Theta)^2}$. Виконаємо перетворення функції

$\cos(\alpha + \beta) + \sin(\alpha + \beta)$ з урахуванням попередніх зауважень:

$$\begin{aligned} \cos(\alpha + \beta) + \sin(\alpha + \beta) &= \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta + \\ &+ \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta = \cos \alpha (\cos \beta + \sin \beta) + \\ &+ \sin \alpha (\cos \beta - \sin \alpha) = \cos k\Theta (a + c\Theta + \\ &+ \sqrt{1 - (a + c\Theta)^2} + \sin k\Theta (a + c\Theta - \sqrt{1 - (a + c\Theta)^2}) \end{aligned}$$

Остаточно рівняння (2.11) матиме вигляд

$$\begin{aligned} \ddot{\Theta} + f \frac{g}{R} \sin(\Theta + \Theta_0) [\cos(k\Theta)(a + c\Theta + \sqrt{1 - (a + c\Theta)^2}) + \\ + \sin(k\Theta)(a + c\Theta - \sqrt{1 - (a + c\Theta)^2})] + f\dot{\Theta}^2 = \frac{g}{R} \cos(\Theta + \Theta_0) \end{aligned} \quad (2.17)$$

В запропонованому сепараторі відсутні пристрої для очищення розподільних поверхонь, тому виявлення умов, при яких вони забиваються, є важливою задачею теорії інерційно-гравітаційних сепараторів. Виділення часток може статися тільки в тому місці каналу, яке визначається значенням S_{np} , де його ширина $b(s)$ буде рівна прохідному розміру частки d_e .

Розглянемо умови проходу частки зерна через решето. Умова проходу буде виконуватися у випадку

$$2r_e = b(s) = b_0 + \frac{2(b_k - b_0)S_{nprox}}{\pi R},$$

звідки $S_{nprox} = \frac{\pi R(2r_e - b_0)}{2(b_k - b_0)}$, тоді

$$\Theta_{nprox} = \frac{\pi (2r_e - b_0)}{2 (b_k - b_0)}. \quad (2.18)$$

Умова, коли частка не застрягає у отворах решета (рис.2.8) буде виконуватися у випадку, коли при Θ_{prox}

$$F_{\tau} < G \cos(\Theta_{prox} + \Theta_0) - m\ddot{S}^2. \quad (2.19)$$

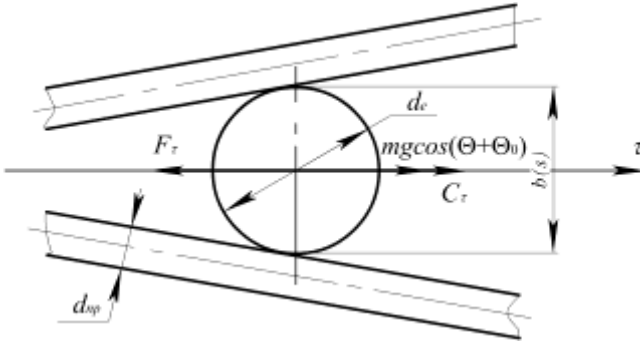


Рис.2.8. Схема до визначення умов проходження частки

Рівняння (2.17) описує рух часток по решеті сепаратора. Воно пов'язує конструктивні параметри решета (R , S , d_{np} , b_0 , b_k , α) і фізико-механічні властивості зерна (f , d_e). Його рішення дозволить визначити умови проходження частки через решето (2.18) при умові, що вона не застрягає в отворах решета (2.19).

Для розв'язку рівняння (2.17) запишемо його у такому вигляді

$$\ddot{\Theta} + f\dot{\Theta}^2 = F(\Theta), \quad (2.20)$$

$$F(\Theta) = f \frac{g}{R} \sin(\Theta + \Theta_0) [\cos(k\Theta) \times$$

$$\text{де} \quad \times (a + c\Theta + \sqrt{1 - (a + c\Theta)^2}) +$$

$$+ \sin(k\Theta)(a + c\Theta - \sqrt{1 - (a + c\Theta)^2})] - \frac{g}{R} \cos(\Theta + \Theta_0)$$

Розглянемо функції $\sin(\Theta + \Theta_0) \cos k\Theta$ і $\sin(\Theta + \Theta_0) \sin k\Theta$, які входять в функцію $F(\Theta)$:

$$\begin{aligned} \sin(\Theta + \Theta_0) \cos k\Theta &= \\ &= \frac{1}{2} [\sin(\Theta(1+k) + \Theta_0) + \sin(\Theta(1-k) + \Theta_0)]; \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} \sin(\Theta + \Theta_0) \sin k\Theta &= \\ &= \frac{1}{2} [\cos(\Theta(1-k) + \Theta_0) - \cos(\Theta(1+k) + \Theta_0)] \end{aligned} \quad (2.22)$$

Тоді з урахуванням (2.21), (2.22)

$$\begin{aligned} F(\Theta) = & -\frac{fg}{2R} \{ (a + c\Theta + \sqrt{1 - (a + c\Theta)^2}) [\sin(\Theta(1+k) + \Theta_0) + \\ & + \sin(\Theta(1-k) + \Theta_0) + (a + c\Theta - \sqrt{1 - (a + c\Theta)^2}) [\cos(\Theta(1- \\ & - k) + \Theta_0) - \cos(\Theta(1+k) + \Theta_0)] \} + \frac{g}{R} \cos(\Theta + \Theta_0) \end{aligned}$$

При розв'язуванні диференціального рівняння (2.20) будемо використовувати традиційний метод пониження порядку рівняння, яке не має явної залежності від аргументу. Введемо функцію

$$\dot{\Theta} = P(\Theta), \quad \ddot{\Theta} = \frac{dP}{d\Theta} \dot{\Theta} = \frac{dP}{d\Theta} P = \dot{P}P.$$

Тоді рівняння (2.20) приймає вигляд рівняння Бернуллі

$$\dot{P}P + fP^2 = F(\Theta). \quad (2.23)$$

Введемо заміну: $Z(\Theta) = P^2$, $\dot{Z} = 2P\dot{P}$. Тоді $\frac{1}{2}\dot{Z} + fZ = F(\Theta)$, а

рівняння (2.23) запишемо у вигляді

$$\dot{Z} + 2fZ = 2F(\Theta). \quad (2.24)$$

Вираз (2.24) є лінійним неоднорідним рівнянням першого порядку, яке розв'язується з допомогою заміни

$$Z(\Theta) = U(\Theta) \cdot V(\Theta), \quad \dot{Z} = \dot{U}V + U\dot{V}. \quad \dot{U}V + U\dot{V} + 2fUV = 2F(\Theta).$$

$$\dot{U}V + U(\dot{V} + 2fV) = 2F(\Theta). \quad \dot{V} + 2fV = 0; \quad \frac{dV}{d\Theta} = -2fV;$$

$$\frac{dV}{V} = -2fd\Theta; \quad \ln V = -2f\Theta; \quad V = e^{-2f\Theta}. \quad \dot{U}e^{-2f\Theta} = 2F(\Theta),$$

$$\frac{dU}{d\Theta} = 2F(\Theta)e^{2f\Theta}.$$

$$U = 2 \int F(\Theta)e^{2f\Theta} d\Theta. \quad (2.25)$$

Деякі інтеграли, які входять в рівняння (2.25), не беруться в елементарних функціях. Якщо знехтувати константою c , яка значно менша в порівнянні з a ($a/c \approx 100$), то $F(\Theta)$ прийме вигляд

$$\begin{aligned} F(\Theta) = & -\frac{fg}{2R} \{ (a + \sqrt{1-a^2}) [\sin(\Theta(1+k) + \Theta_0) + \\ & + \sin(\Theta(1-k) + \Theta_0) + (a + \sqrt{1-a^2}) [\cos(\Theta(1- \\ & - k) + \Theta_0) - \cos(\Theta(1+k) + \Theta_0)] \} + \frac{g}{R} \cos(\Theta + \Theta_0) \end{aligned} \quad (2.26)$$

З урахуванням даних наближень, інтеграл (2.26) може бути взятий методом інтегрування по частинах. Після інтегрування отримаємо

$$\begin{aligned}
U = & -\frac{2f^2 g}{R} e^{2J\Theta} \{ (a + \sqrt{1-a^2}) \left[\frac{1}{4f^2 + (1+k)^2} (\sin(\Theta(1+k) + \Theta_0) - \right. \\
& - \frac{1+k}{2f} \cos(\Theta(1+k) + \Theta_0)) + \frac{1}{4f^2 + (1-k)^2} (\sin(\Theta(1-k) + \Theta_0) - \\
& - \frac{1-k}{2f} \cos(\Theta(1-k) + \Theta_0)) \left. \right] + (a - \sqrt{1-a^2}) \left[\frac{1}{4f^2 + (1-k)^2} (\cos(\Theta(1- \right. \\
& - k) + \Theta_0) + \frac{1-k}{2f} \sin(\Theta(1-k) + \Theta_0)) - \frac{1}{4f^2 + (1+k)^2} (\cos(\Theta(1+ \\
& + k) + \Theta_0) + \frac{1+k}{2f} \sin(\Theta(1+k) + \Theta_0)) \left. \right] \} + \frac{2fg}{R(4f^2 + 1)} e^{2J\Theta} [\cos(\Theta + \Theta_0) + \\
& + \frac{1}{2f} \sin(\Theta + \Theta_0)] + C_1
\end{aligned} \tag{2.27}$$

$$\dot{\Theta} = \sqrt{UV} = (UV)^{\frac{1}{2}}. \tag{2.28}$$

$$V = e^{-2J\Theta}. \tag{2.29}$$

З урахуванням (2.27 – 2.29) отримаємо:

$$\begin{aligned}
\dot{\Theta} = & \left\{ \frac{2fg}{R(4f^2 + 1)} [\cos(\Theta + \Theta_0) + \frac{1}{2f} \sin(\Theta + \Theta_0)] - \frac{2f^2 g}{R} \{ (a + \right. \\
& + \sqrt{1-a^2}) \left[\frac{1}{4f^2 + (1+k)^2} (\sin(\Theta(1+k) + \Theta_0) - \frac{1+k}{2f} \cos(\Theta(1+k) + \right. \\
& + \Theta_0)) + \frac{1}{4f^2 + (1-k)^2} (\sin(\Theta(1-k) + \Theta_0) - \frac{1-k}{2f} \cos(\Theta(1-k) + \right. \\
& + \Theta_0)) \left. \right] + (a - \sqrt{1-a^2}) \left[\frac{1}{4f^2 + (1-k)^2} (\cos(\Theta(1-k) + \Theta_0) + \right. \\
& + \frac{1-k}{2f} \sin(\Theta(1-k) + \Theta_0)) - \frac{1}{4f^2 + (1+k)^2} (\cos(\Theta(1+k) + \Theta_0) + \\
& + \frac{1+k}{2f} \sin(\Theta(1+k) + \Theta_0)) \left. \right] \} + C_1 \left. \right\}^{\frac{1}{2}}
\end{aligned} \tag{2.30}$$

Якщо взяти до уваги, що показник кінематичного режиму $K = \frac{\omega^2 R}{g}$,

$\dot{\Theta} = \frac{V}{R}$, то (2.30) після відповідних перетворень запишемо у вигляді

$$\begin{aligned}
 K = & \frac{2f}{4f^2 + 1} [\cos(\Theta + \Theta_0) + \frac{1}{2f} \sin(\Theta + \Theta_0)] - 2f^2 \{ (a + \\
 & + \sqrt{1 - a^2}) [\frac{1}{4f^2 + (1+k)^2} (\sin(\Theta(1+k) + \Theta_0) - \frac{1+k}{2f} \cos(\Theta(1+k) + \Theta_0)) + \\
 & + \frac{1}{4f^2 + (1-k)^2} (\sin(\Theta(1-k) + \Theta_0) - \frac{1-k}{2f} \cos(\Theta(1-k) + \Theta_0))] + \\
 & + (a - \sqrt{1 - a^2}) [\frac{1}{4f^2 + (1-k)^2} (\cos(\Theta(1-k) + \Theta_0) + \frac{1-k}{2f} \sin(\Theta(1-k) + \Theta_0)) - \\
 & - \frac{1}{4f^2 + (1+k)^2} (\cos(\Theta(1+k) + \Theta_0) + \frac{1+k}{2f} \sin(\Theta(1+k) + \Theta_0))] + C_1
 \end{aligned} \quad (2.31)$$

Для часткового розв'язку з початковими умовами $V = V_0$, $\Theta = \Theta^0$,

константа C_1 має вигляд

$$\begin{aligned}
 C_1 = & \left(\frac{V_0}{R} \right)^2 - \frac{g}{R} \left[\frac{2f}{4f^2 + 1} [\cos(\Theta_0) + \frac{1}{2f} \sin(\Theta_0)] - 2f^2 \{ (a + \right. \\
 & + \sqrt{1 - a^2}) [\frac{1}{4f^2 + (1+k)^2} (\sin(\Theta_0) - \frac{1+k}{2f} \cos(\Theta_0)) + \\
 & + \frac{1}{4f^2 + (1-k)^2} (\sin(\Theta_0) - \frac{1-k}{2f} \cos(\Theta_0))] + \\
 & + (a - \sqrt{1 - a^2}) [\frac{1}{4f^2 + (1-k)^2} (\cos(\Theta_0) + \frac{1-k}{2f} \sin(\Theta_0)) - \\
 & - \frac{1}{4f^2 + (1+k)^2} (\cos(\Theta_0) + \frac{1+k}{2f} \sin(\Theta_0))] \}
 \end{aligned} \quad (2.32)$$

Таким чином, отриманий розв'язок (2.30) дозволяє встановити залежність зміни швидкості руху частки по поверхні решета в залежності від факторів, які входять в рівняння (2.17).

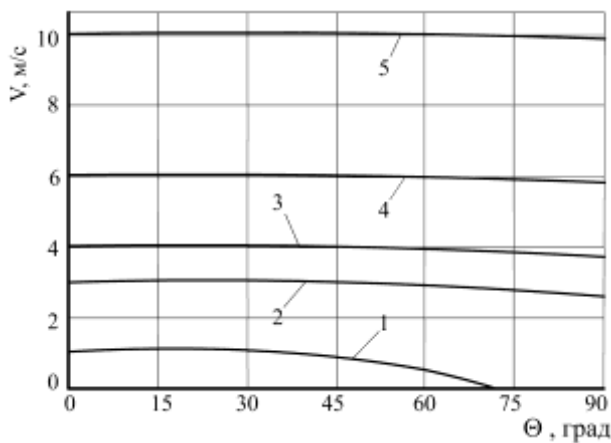
2.4. Аналіз математичної моделі руху частки

Важливою задачею аналізу математичної моделі руху частки є встановлення мінімальних значень початкової швидкості її руху і радіусу решета R при рівних інших умовах (2.18) та (2.19), бо в усіх інших випадках може відбуватися застрягання частки в отворах решета.

При виборі конкретних значень параметрів були прийняті до уваги наступні міркування. В реальних умовах повинна бути задана довжина отвору решета, яка буде залежати від її радіусу R і кінцева ширина b_{κ} , яка визначається кутом розхилу прутків у поперечному перерізі α_{κ} . Зміна ширини отвору решета по довжині впливає на якість сепарації. Як відмічає Лестошнев М.Н. [71], зміна ширини отворів решіт в межах величини класового проміжку не виявляє суттєвого впливу на кінцевий результат. Тому в даній роботі ширина отворів в кінцевій частині решета b_{κ} прийнята в межах класового проміжку $b_{\kappa} = b_0 + \Delta b$ при $\Delta b = \lambda$, де λ – величина класового проміжку. Із цієї умови визначали і кут розхилу прутків у вертикальній площині.

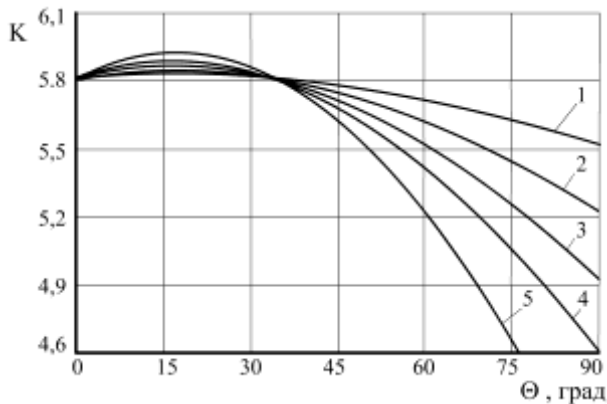
Аналіз графічних залежностей (рис. 2.9, 2.10), виконаний на основі рішення рівняння (2.30), показує, що зміною початкової швидкості руху V_0 і радіуса решета R можна досягти різних кінематичних режимів руху частки, які необхідні для проходження процесу сепарації.

Збільшення радіусу викликає необхідність підвищення початкової швидкості. Так наприклад, при $V_0 = 1$ м/с ($R = 300$ мм) кутова швидкість частки в точці $\Theta = 75^0$ стає рівною $\omega = 0$. При підвищенні початкової швидкості при тому ж радіусі, даного випадку не спостерігається.



$R = 300 \text{ мм}$
 $f = 0,35$
 $d_e = 1,9 \text{ мм}$
 $d_{np} = 1,5 \text{ мм}$
 $b_0 = 1,8 \text{ мм}$
 $b_k = 2,0 \text{ мм}$

Рис. 2.9. Залежність зміни швидкості руху частки V від кута Θ при різних значеннях початкової швидкості V_0 : 1 – $V_0 = 1 \text{ м/с}$; 2 – $V_0 = 3 \text{ м/с}$; 3 – $V_0 = 4 \text{ м/с}$; 4 – $V_0 = 6 \text{ м/с}$; 5 – $V_0 = 10 \text{ м/с}$



$V_0 = 4 \text{ м/с}$
 $f = 0,35$
 $d_e = 1,9 \text{ мм}$
 $d_{np} = 1,5 \text{ мм}$
 $b_0 = 1,8 \text{ мм}$
 $b_k = 2,0 \text{ мм}$
 $\alpha_k = 20^0$

Рис.2.10. Залежність зміни показника кінематичного режиму при різних значеннях радіусу: 1 – $R = 150 \text{ мм}$; 2 – $R = 300 \text{ мм}$; 3 – $R = 500 \text{ мм}$; 4 – $R = 700 \text{ мм}$; 5 – $R = 1000 \text{ мм}$

Аналіз графічних залежностей (рис. 2.11–2.13) впливу на кінематичний показник руху частки (d_{np} , Θ_0 , f) свідчить про те, що їх збільшення приводить однозначно до його зменшення.

Особливі труднощі виділення створюються для часток в кінцевій частині решета з умовами $d_e \geq b_k$. Такі частки застрягають в кінці решета і створюють умови для її забивання. Для усунення даного явища в кінці решета необхідно передбачити розширення для вільного сходу таких часток.

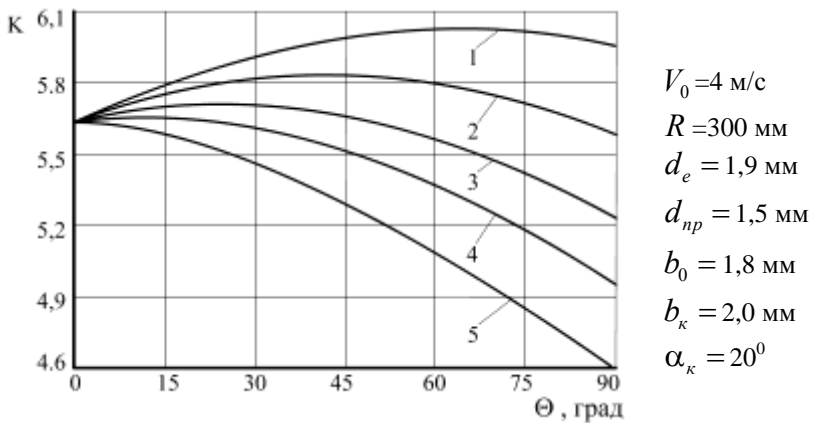
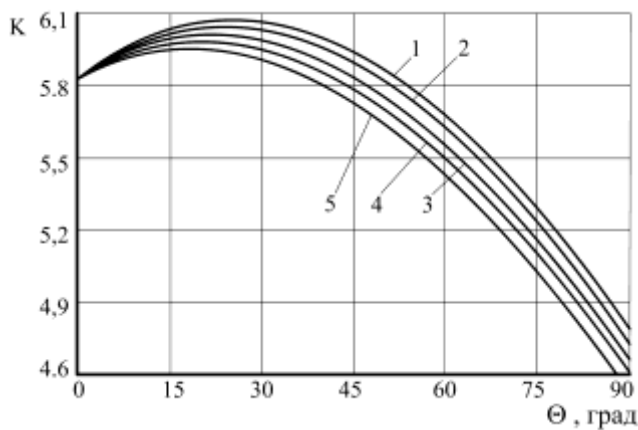


Рис.2.11. Залежність зміни показника кінематичного режиму K при різних значеннях коефіцієнта тертя f :

$$1 - f = 0,2; 2 - f = 0,3; 3 - f = 0,4; 4 - f = 0,5; 5 - f = 0,6$$

Аналіз графіків (рис.2.10 – 2.13) показує, що найбільший вплив на показник кінематичного режиму справляють радіус решета і початкова швидкість руху зерна. Зміною цих параметрів можна добиватися необхідної ефективності сепарації.

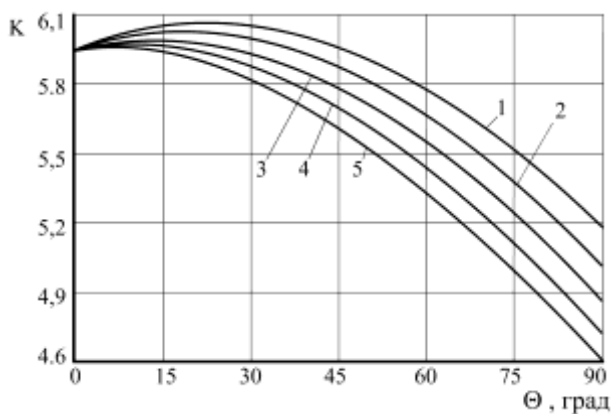


$$\begin{aligned}
 V_0 &= 4 \text{ м/с} \\
 R &= 300 \text{ мм} \\
 f &= 0,35 \\
 d_e &= 1,9 \text{ мм} \\
 b_0 &= 1,8 \text{ мм} \\
 b_\kappa &= 2,0 \text{ мм} \\
 \alpha_\kappa &= 20^0
 \end{aligned}$$

Рис. 2.12. Залежність зміни показника кінематичного режиму K при

різних значеннях діаметру прутків d_{np} : 1 – $d_{np} = 1,5$ мм;

2 – $d_{np} = 2,5$ мм; 3 – $d_{np} = 3,0$ мм; 4 – $d_{np} = 5,0$ мм; 5 – $d_{np} = 6,0$ мм



$$\begin{aligned}
 V_0 &= 4 \text{ м/с} \\
 R &= 300 \text{ мм} \\
 f &= 0,35; \\
 b_0 &= 1,8 \text{ мм} \\
 b_\kappa &= 2,0 \text{ мм} \\
 d_e &= 1,9 \text{ мм} \\
 d_{np} &= 1,5 \text{ мм}
 \end{aligned}$$

Рис. 2.13. Залежність зміни показника кінематичного режиму K при

різних значеннях Θ_0 : 1 – $\Theta_0 = 0^0$; 2 – $\Theta_0 = 5^0$; 3 – $\Theta_0 = 10^0$;

4 – $\Theta_0 = 15^0$; 5 – $\Theta_0 = 20^0$

Аналіз графічних залежностей, приведених на рис. 2.14, показує, що збільшення K відбувається при збільшенні початкової швидкості, а збільшення радіусу приводить до його зменшення. Тому радіус решета необхідно вибирати із умови технологічної ефективності проходження процесу при необхідній довжині решета, яка буде забезпечувати проходження процесу сепарації і максимальній швидкості.

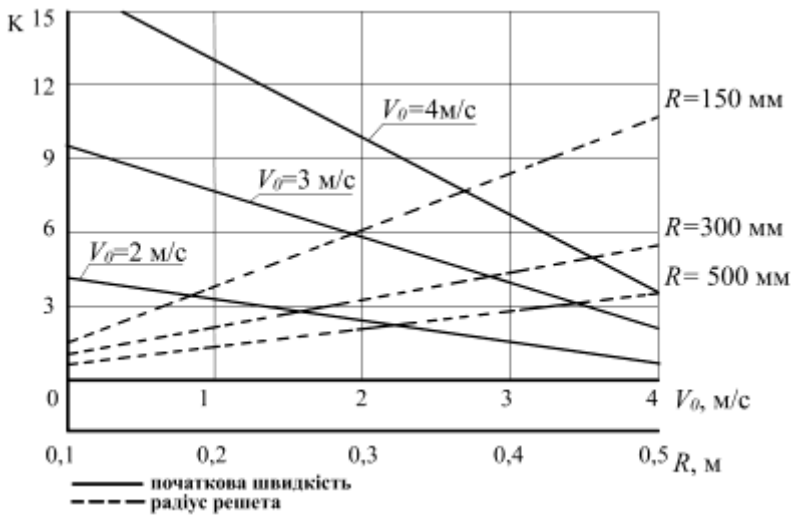


Рис. 2.14. Зміна показника кінематичного режиму K при різних значеннях початкової швидкості подачі зерна V_0 і радіуса решета R

2.5. Розробка математичної моделі процесу сепарації

2.5.1. Теоретичне обґрунтування процесу сепарації

Для складання математичної моделі процесу сепарації на основі теорії ймовірності розглянемо рух часток по ділянці решета із двох прутків, параметрами якого є R , b_0 , b_k , α , T – відповідно, радіус решета; початкова і кінцева ширина клиноподібних отворів; кут, який

визначає розхил прутків у поперечному перерізі; крок розташування прутків (рис. 2.15).

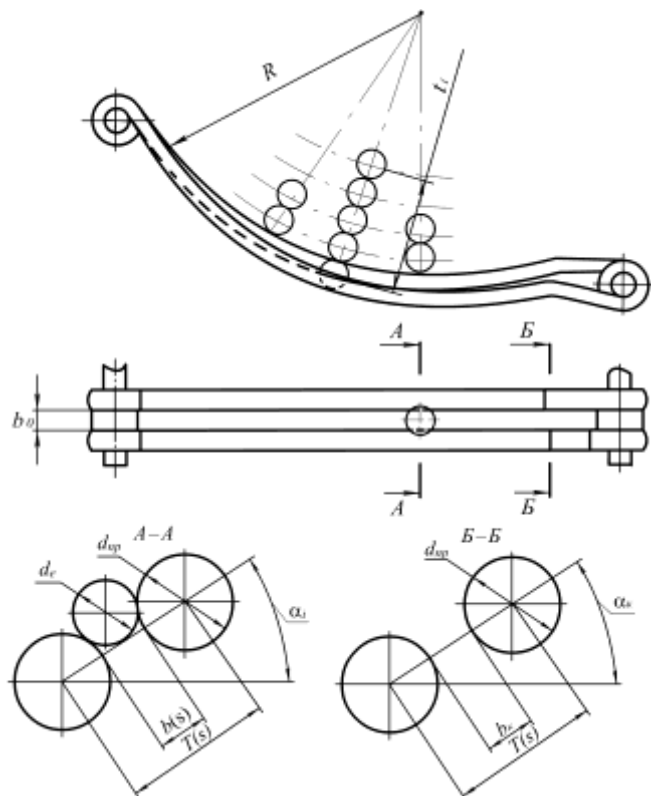


Рис. 2.15. Схема до обґрунтування математичної моделі процесу сепарації

Приймемо, що частки зерна мають кулеподібну форму і рухаються по поверхні решета без відривання і з постійною швидкістю. Допущення про кулеподібну форму часток застосовується в аналогічних випадках багатьма авторами [71, 72 та ін.]. Припущення про постійну швидкість у визначеній мірі підтверджується результатами аналізу детермінованої математичної моделі процесу руху. Далі уявимо, що частки переміщуються пошарово, при чому їх переміщення між сусідніми

елементарними шарами, тобто самосортування відсутнє, а у випадку проходження часток із нижнього шару крізь клиноподібні отвори їх місця послідовно заповнюються частками із верхніх шарів.

Розглянемо ділянку решета, яка включає одну клиноподібного отвору шириною рівною кроку T , по якій рухається зерно шаром висотою

$$H = \frac{q_b}{\gamma \omega R}, \quad (2.33)$$

де q_b – питоме навантаження на одиницю ширини поверхні решета; γ – об’ємна маса зерна; ω – кутова швидкість руху частки; R – радіус решета.

Попередньо припустимо, що зерно складається із часток однакового діаметру d_e . Для визначення ймовірності виділення часток в даному випадку приймемо, що початкове положення знаходження центра маси будь-якої із них в будь-якій точці ділянки решета шириною $T(s)$ рівно ймовірне. Цій умові відповідає припущення про рівномірний розподіл їх на поверхні решета. Процес виділення через решето частки із i -того елементарного шару ($i = 1, 2, 3 \dots n$ – номер шару від поверхні решета; $n = H/d_e$ – загальне число елементарних шарів часток діаметром d_e на поверхні решета) можна розглядати як складний випадок [19, 34], що включає три залежних простих:

- перший – центр маси частки виявиться над площиною клиноподібного отвору;
- другий – може пройти через клиноподібний отвір;
- третій – клиноподібний отвір вільний від непросіяних крізь нього часток з нижніх елементарних шарів.

Значення ймовірності появи першого випадку залежить від геометричних параметрів решета і визначається за формулою

$$P_1^i = \frac{b(s)_i}{T(s)_i}, \quad (2.34)$$

де $b(s)_i$ – розрахункова ширина клиноподібного отвору для i -того елементарного шару, яка є функцією її довжини S (рис. 2.16), тобто

$$b(s)_i = b_0 + \frac{2(b_\kappa - b_0)S_i}{\pi R},$$

де $T(s)$ – крок між прутками, $T(s) = b(s) + d_{np}$.

Ймовірність появи другого випадку залежить від співвідношення еквівалентного діаметра частки зерна d_e і ширини клиноподібного отвору $b(s)_i$.

$$P_2^i = \frac{b(s)_i - \frac{2}{\pi} d_e}{b(s)_i}. \quad (2.35)$$

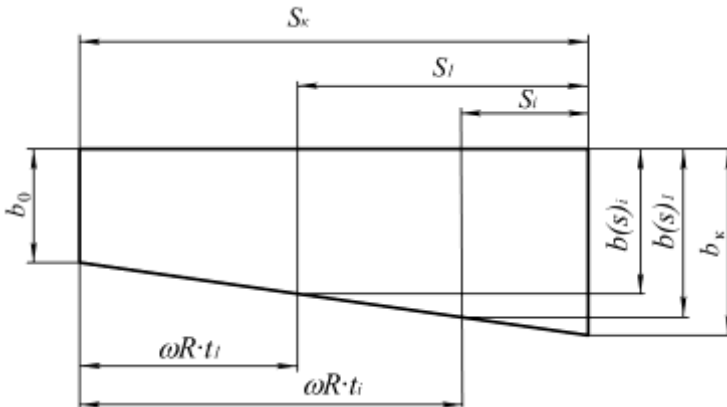


Рис. 2.16. Схема до визначення ширини клиноподібного отвору

Ймовірність того, що клиноподібний отвір вільний для проходження часток i -того елементарного шару ($i > 1$) визначається множенням ймовірностей проходження крізь отвори часток всіх шарів, які лежать нижче, тобто

$$P_3^i = \prod_{a=1}^{i-1} P_2^a. \quad (2.36)$$

Ймовірність просіювання часток діаметром d_e із i -того елементарного шару дорівнює добутку ймовірностей трьох випадків і має вигляд

$$P^i = P_1^i P_2^i P_3^i.$$

З урахуванням (2.34-2.36) для i -того елементарного шару ($i > 1$), отримаємо

$$P^i = \frac{1}{T} (b(s)_i - \frac{2d_e}{\pi}) \prod_{a=1}^{i-1} (\frac{b(s)_a - \frac{2d_e}{\pi}}{b(s)_a}),$$

або

$$P^i = \frac{1}{T} \prod_{a=1}^i (b(s)_i - \frac{2d_e}{\pi}) \{ \prod_{a=1}^{i-1} (b(s)_a) \}^{-1}. \quad (2.37)$$

Із аналізу рівняння (2.37) випливає, що визначення ймовірності виділення часток із i -того шару звелось до визначення розрахункової ширини клиноподібного отвору для кожного із елементарних шарів. Під шириною $b(s)$ клиноподібного отвору необхідно розуміти її ширину на довжині, що дорівнює максимальному переміщенню по клиноподібному отвору часток із i -того елементарного шару, які досягли площини решета і “встигли” виділитися через неї. Частки вважаються такими, що пройшли через решето тоді, коли їх центр маси знаходиться нижче площини

прутків поверхні решета на відстані, яка перевищує половину їх діаметра. Тоді виділення часток із першого елементарного шару в клиноподібний отвір завершується через деякий час t після того як складуться умови виділення. Для визначення значення t припустимо, що частки, для яких склались умови виділення, проходять крізь клиноподібний отвір решета під дією нормальної складової відцентрової сили та сили тяжіння.

Звідси маємо

$$t = \sqrt{\frac{2d_e}{g \sin(\Theta + \Theta_0) + \omega^2 R}}.$$

Аналогічно запишемо значення t_i для i -того елементарного шару

$$t_i = \sqrt{\frac{2id_e}{g \sin(\Theta + \Theta_0) + \omega^2 R}}. \quad (2.38)$$

Таким чином, із першого елементарного шару встигне завершитися виділення тільки тих часток, для яких склались умови виділення на довжині отвору $S_1 \leq (S_\kappa - \omega R t_1)$. Тоді для першого елементарного шару значення $b(s)_1$

$$b(s)_1 = b_0 + \frac{2(b_\kappa - b_0)\omega t_1}{\pi},$$

а для часток i -того елементарного шару рівнянням:

$$b(s)_i = b_0 + \frac{2(b_\kappa - b_0)\omega t_i}{\pi}. \quad (2.39)$$

Записуючи рівняння (2.39) з урахуванням (2.38) отримаємо

$$b(s)_i = b_0 + \frac{2(b_\kappa - b_0)\omega \sqrt{\frac{2id_e}{g \sin(\Theta + \Theta_0) + \omega^2 R}}}{\pi}. \quad (2.40)$$

У відповідності з приведеним, отримані формули справедливі для однокомпонентної суміші, яка складається із однакових часток діаметром d_e . Однак в реальних умовах число компонентів може бути нескінченно великим, про що свідчить випадковий характер розподілу за розмірами часток зерна [39]. Недоліком приведеної вище математичної моделі є те, що вона не враховує розмірну характеристику вихідного матеріалу, тому результати порівняльної оцінки, виконані за її допомогою, не завжди є достатньо об'єктивними і достовірними. Для усунення цього недоліку доцільно ввести коефіцієнт приведення, який би враховував розмірну характеристику оброблюваного матеріалу. Таким може бути деякий коефіцієнт χ , який представляє собою відношення величини середнього робочого розміру отворів решета b_{cp} до величини середнього відхилення l_{cp} від цієї величини відповідних розмірів часток зерна

$$\chi = \frac{b_{cp}}{l_{cp}}, \quad (2.41)$$

де $l_{cp} = b_{cp} - C_{cp}$ – середньостатистичний розмір часток зерна за ознакою розділення, який визначається за відомою формулою [71]

$$C_{cp} = \frac{\sum C_i a_i}{\sum a_i}.$$

Тоді з урахуванням (2.41) формулу (2.37) запишемо у вигляді

$$P^i = \frac{1}{T} \prod_{a=1}^i (b(s)_i - \frac{2\chi d_e}{\pi}) \{ \prod_{a=1}^{i-1} (b(s)_a) \}^{-1}. \quad (2.42)$$

Ступінь розділення оброблюваного матеріалу можна визначити за формулою [19]

$$\varepsilon = 1 - e^{-\mu S}, \quad (2.43)$$

де μ – коефіцієнт сепарації, який представляє собою відношення ймовірності просіювання на величину переміщення шару зерна до виходу із решета і визначається за формулою [19]

$$\mu = \frac{P^i}{\omega R \cdot t_i}. \quad (2.44)$$

Із формули (2.43) довжина решета

$$S = \frac{1}{\mu} \ln\left(\frac{1}{1-\varepsilon}\right). \quad (2.45)$$

і відповідно радіус

$$R = \frac{2}{\mu\pi} \ln\left(\frac{1}{1-\varepsilon}\right).$$

Сумісне рішення рівнянь (2.33), (2.40), (2.42), (2.44), (2.45) дозволяє визначити необхідні параметри решітчастого сепаратора при заданому питомому навантаженні і необхідній ефективності сепарації ε . Приведені рівняння при прийнятих допущеннях можуть служити по сукупності наближеною математичною моделлю процесу сепарації зерна, побудованою на елементах теорії ймовірності.

2.5.2. Аналіз математичної моделі процесу сепарації

Аналіз математичної моделі, побудованої на основі елементів теорії ймовірності виконаний при широких інтервалах варіювання конструктивних і режимних параметрів. При виборі їх конкретних значень були прийняті до уваги міркування, аналогічні прийнятим при розгляді і аналізі детермінованої математичної моделі.

Як було відмічено раніше, швидкість руху часток є головною при прогнозуванні випадку “виділення-заклинення”. Із збільшенням швидкості ймовірність застрягування часток при русі їх по розподільній поверхні

зменшується. В такому випадку визначений інтерес представляє встановлення впливу кутової швидкості ω на ефективність виділення прохідової фракції.

На рис.2.17 представлені залежності, які відображають вплив швидкості руху часток на повноту виділення різних прохідових компонентів через поверхню решета. Розрахункові значення отримані при наступних параметрах: $q_g = 6,4 \text{ т/м} \cdot \text{год}$, $\gamma = 700 \text{ кг/м}^3$, $b_0 = 1,8 \text{ мм}$, $b_k = 2,0 \text{ мм}$, $R = 0,3 \text{ м}$. Розміри часток складалась тільки із прохідових компонентів $d_e = 1,2; 1,5; 1,7; 1,8; 2,0 \text{ мм}$. Масові долі кожного компонента були прийняті однаковими і складали по 20%.

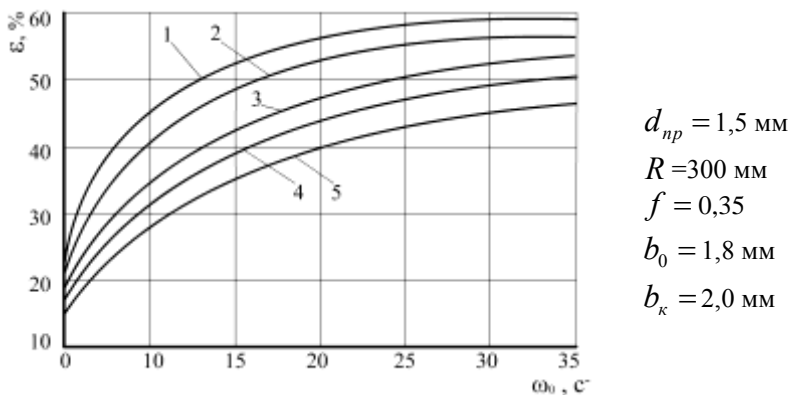


Рис. 2.17. Залежність повноти виділення компонентів від початкової кутової швидкості: 1 — $d_e = 1,2 \text{ мм}$; 2 — $d_e = 1,5 \text{ мм}$; 3 — $d_e = 1,7 \text{ мм}$;

4 — $d_e = 1,8 \text{ мм}$; 5 — $d_e = 2,0 \text{ мм}$

Із аналізу графічних залежностей, приведених на рис.2.17 випливає, що зі зміною початкової кутової швидкості повнота виділення часток різних розмірів змінюється по різному. При збільшенні кутової швидкості ефективність виділення часток всіх розмірів спочатку збільшується, а

потім інтенсивність зменшується. Збільшення кутової швидкості також сприяє розтягуванню шару зерна, що приводить до зменшення його висоти і, як наслідок, підвищується повнота виділення, тому що час занурення в клиноподібний отвір із верхніх шарів зменшується порівняно з перебування їх на поверхні решета. Подальше підвищення швидкості їх руху приводить до зменшення часу перебування на решеті, що є наслідком зменшення ефективності сепарації. Менші значення ефективності виділення крупних домішок пояснюються зменшенням ймовірності їх виділення (формула 2.35). Очевидно, що при цьому деякі частки не встигають “попасти” в отвір, а як наслідок і пройти через решето, навіть якщо вони знаходяться в нижньому елементарному шарі. На основі цього можна зробити висновок, що коли зерно має великий вміст дрібних домішок, процес сепарації необхідно виконувати при більших швидкостях, а по мірі збільшення вмісту крупних домішок швидкість необхідно зменшувати. Залежності (рис. 2.18) показують, що при збільшенні питомого навантаження повнота виділення компонентів зменшується.

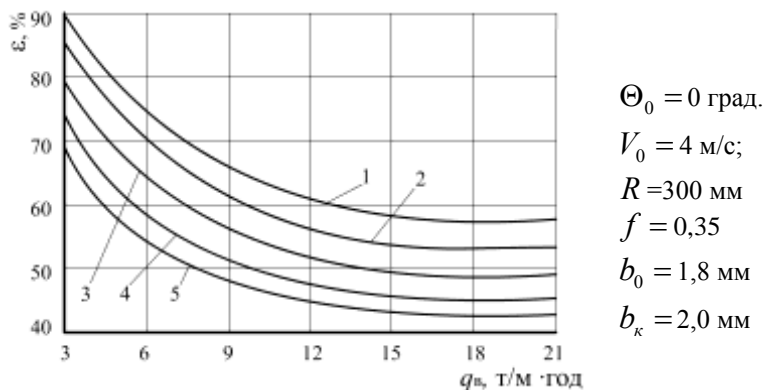


Рис. 2.18. Залежність повноти виділення компонентів різних розмірів при збільшенні питомого навантаження: 1 – $d_e = 1,2 \text{ мм}$; 2 – $d_e = 1,5 \text{ мм}$; 3 – $d_e = 1,7 \text{ мм}$; 4 – $d_e = 1,8 \text{ мм}$; 5 – $d_e = 2,0 \text{ мм}$

Більш високі значення повноти виділення дрібних часток при збільшенні навантаження пояснюється тим, що шлях, який проходить частка із i -того елементарного шару до поверхні решета, менше шляху, який проходять крупні частки. Тому при сепаруванні зернових сумішей з великим вмістом крупних домішок питомі навантаження необхідно зменшувати.

Аналіз (рис. 2.19), показує, що із збільшенням радіусу решета підвищується ймовірність виділення часток, а збільшення діаметра прутків приводить до її зменшення. Очевидно, що збільшення діаметра прутків призводить до зменшення корисної площі решета.

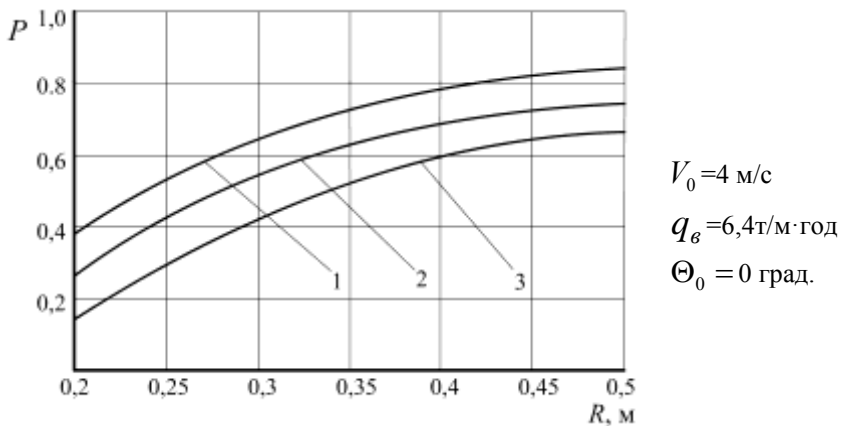


Рис.2.19. Залежність зміни ймовірності просіювання часток від діаметру

прутків решета: 1 – $d_{np} = 2 \text{ мм}$; 2 – $d_{np} = 3 \text{ мм}$; 3 – $d_{np} = 5 \text{ мм}$

Значення зміни коефіцієнта сепарації по довжині решета (рис. 2.20) отримані за формулою (2.44) показують, що із збільшенням радіусу зменшується коефіцієнт сепарації. Однак, при збільшенні радіусу загальний коефіцієнт сепарації для всього решета вищий. Для практичного використання дуже не зручні запропоновані залежності, тому було розраховано коефіцієнт сепарації для різних значень показника кінематичного режиму від питомого навантаження (рис. 2.21).

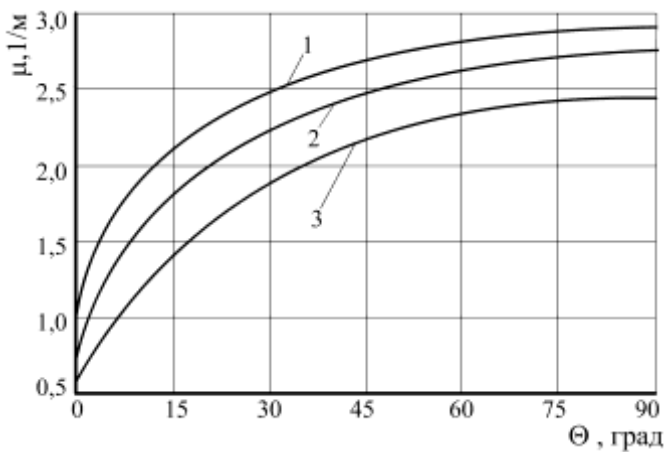


Рис. 2.20. Зміна коефіцієнта сепарації μ по довжині решета: $\Theta_0 = 0$ град; $V_0 = 4$ м/с; $q_e = 6,4$ т/м·год; 1 – $R = 150$ мм; 2 – $R = 300$ мм; 3 – $R = 450$ мм

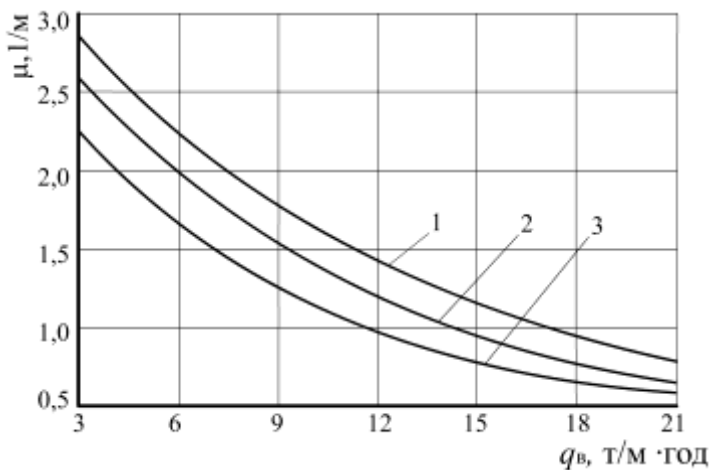


Рис. 2.21. Зміна коефіцієнта сепарації μ від питомого навантаження при різних значеннях показника кінематичного режиму:

1 – $K = 5$; 2 – $K = 10$; 3 – $K = 15$

3

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Методика визначення фізико-механічних властивостей

3.1.1. Визначення коефіцієнтів тертя зерна

Статичний коефіцієнт тертя визначали на похилій поверхні за загальноприйнятою методикою. Дослідний зразок із зерном встановлювали на відповідну робочу поверхню установки ТМ-21 (рис. 3.1) при невеликому куті α її нахилу до горизонту. Потім поступово збільшували нахил робочої поверхні, фіксували кут α_i , при якому зразок починав сковзати вниз. Цей кут приблизно дорівнює куту тертя спокою φ_{cm} , за яким можна визначити коефіцієнт тертя f_{cm} за формулою

$$f_{cm} = tg\varphi_{cm}. \quad (3.1)$$

Для визначення динамічного коефіцієнта тертя робочу площину тертя встановлювали до горизонту під кутом $\alpha > \varphi_{cm}$, який забезпечував сповзання дослідного зразка вниз. Під час дослідів вимірювали час t_i проходження зразком відомих відстаней S_i . Для цього на похилій площині закріплені три блок-контакти, які управляють секундомірами (рис. 3.2). У вихідному положенні всі блокконтакти замкнуті, а секундоміри вимкнуті. При розмиканні першого із них включаються обидва секундоміри; при розмиканні другого - один секундомір зупиняється; при роз'єднанні третього – зупиняється другий секундомір.

Динамічний коефіцієнт тертя визначали за формулою

$$f_o = \frac{f_1 + f_2}{2}, \quad (3.2)$$

де f_1 і f_2 – розрахункові значення коефіцієнтів тертя для дослідного зразка на ділянках похилої площини S_1 і S_2 , які безпосередньо для несипучих зразків визначали за відомою формулою [95].

$$f_i = \operatorname{tg} \alpha - \frac{2S_i}{gt_i \cos \alpha},$$

де S_i – шлях, пройдений дослідним зразком за час t_i при початковій швидкості руху $V_0 = 0$; t_i – середній час для даного зразка.



Рис. 3.1. Загальний вигляд установки ТМ-21

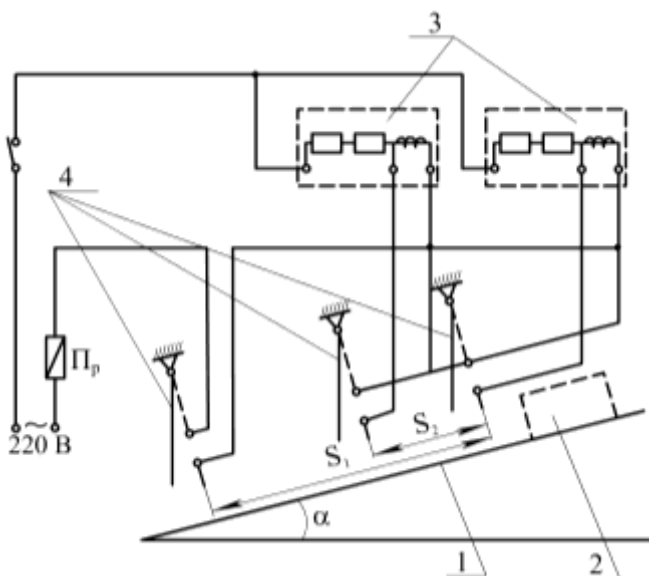


Рис. 3.2. Схема до визначення коефіцієнтів тертя: 1 – робоча похила площина, 2 – дослідний зразок, 3 – секундоміри, 4 – блок-контакти

3.1.2. Визначення фракційного складу зерна та його вологості

При дослідженні процесу сепарації використовували зерно насіння пшениці "Скіф'янка" попередньо оброблене вертикальним повітряним потоком в аспіраційному каналі для видалення легких домішок. Потім отриманий матеріал обробляли на досліджуваному сепараторі.

Відносний вміст підсіву у вихідному матеріалі, у відсотках, визначали за формулою

$$\Phi = \frac{\sum P_0}{G} 100 ,$$

де $\sum P_0$ – сумарна маса підсіву, який виділився через решето; G – загальна маса оброблюваного матеріалу.

Розмірну характеристику зерна і підсіву отримали шляхом обробки середніх проб на ручному плоскорешітковому класифікаторі за загальноприйнятою методикою [95]. Чистоту і вміст домішок визначали за ГОСТ 12037-81 “Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения чистоты и отхода семян”. Визначення вологості зерна здійснювалось методом прямого висушування згідно ГОСТ 12041-82 “Семена сельскохозяйственных культур. Метод определения влажности”.

3.2. Методика перевірки на адекватність математичних моделей

3.2.1. Опис будови і роботи експериментальної установки

Для встановлення адекватності запропонованих математичних моделей розроблена експериментальна установка, загальний вигляд і схема якої представлені на рис. 3.3 і 3.4.

Установка (рис. 3.4) складається із рами 1, на якій закріплений бункер 2, направляючий лоток-зернопровід 3 з решетою 4, пробовідбірники 5, які розділені на 4 секції. На осях 6, 7, 8 закріплені заслінки 9, 10, 11. Бункер 2 обладнаний заслінками 15, 16 для перекривання і регулювання подачі зерна. Зміна положення регулювальної заслінки 15 здійснюється за допомогою гвинтового регулятора 17. Бункер 2 до рами 1 кріпиться за допомогою гвинтів, що дає можливість переміщувати його по висоті відносно решета, чим досягається регулювання необхідної швидкості зерна. Гвинти притискують направляючий лоток до стінок бункера, який одночасно служить боковою стінкою. Пробовідбірники 5 обладнані заслінкою 14 для почергового збирання зерна, яке пройшло крізь решето. За допомогою кутиків з отворами здійснюється зміна кута нахилу направляючого лотка 3, що досягається поворотом установки відносно точки А.

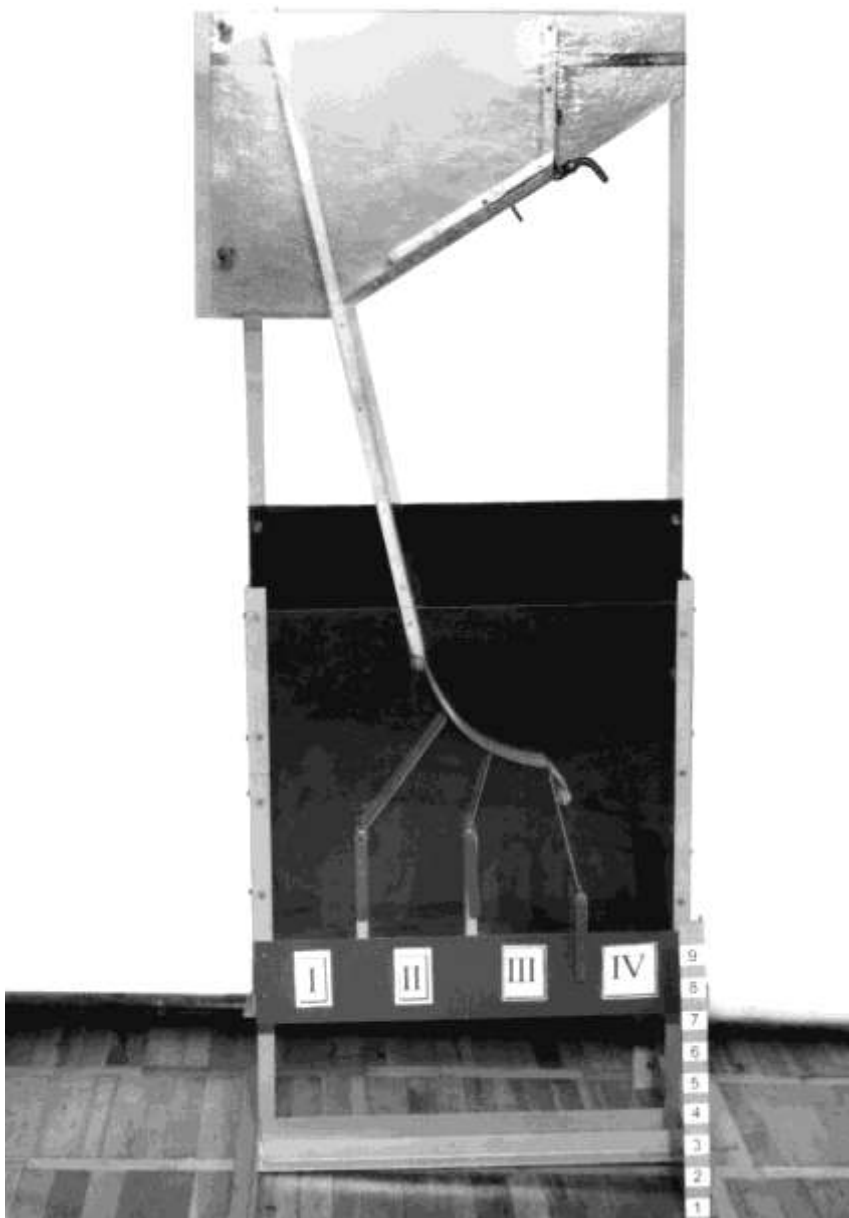
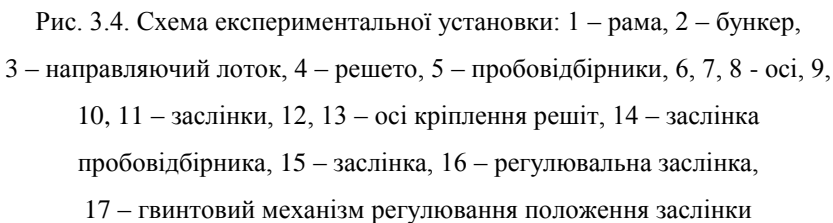


Рис. 3.3. Загальний вигляд експериментальної установки



Це дозволяє змінювати як положення самого решета, яке визначається кутом Θ_0 його відхилення від горизонтального радіусу, так і швидкість руху зерна. Подача зерна із бункера 2 на решето 4 здійснюється самотоком по направляючому лотку 3. Величина подачі регулюється зміною площі живильного отвору в бункері 2 за допомогою регулювальної заслінки 15, яка встановлюється в необхідне положення за допомогою гвинтового механізму 17.

Решето 4 (рис. 3.5) набране із прутків круглого поперечного профілю, радіально зігнутих по дузі круга, і закріплене на осях 12 і 13. Регулювання робочих розмірів решета здійснювалось за допомогою набору калібрувальних шайб відповідної товщини. Величину розхилу прутків регулювали їхнім розхилом у вертикальній площині на осі 13. Для попередження розтікання зерна за межі робочої зони решета і направляючого лотка на їх зовнішньому торці закріплені щоківини.

Зерно, яке поступає із бункера 2 на направляючий лоток 3, рухається прискорено із ковзанням по решету 4. При цьому частки, які проходять крізь решето, направляються у відповідні пробовідбірники I, II, III, а крупні домішки в кінці свого руху направляються в пробовідбірник IV. Зміна положення заслінок 9, 10, 11 дає можливість дослідити проходження процесу сепарації по довжині решета.

В усіх залежних дослідах однієї серії використовували рівноцінний вихідний матеріал однієї партії, який спочатку ретельно перемішували, а потім методом діагонального ділення розподіляли для всіх дослідів даної серії. Перед завантаженням зерна в бункер установки визначали його вологість і розмірну характеристику. Величину подачі зерна на решето встановлювали регулювальною заслінкою 16 за допомогою гвинта 17 за попередньо відтарованій діаграмі, яка показує залежність величини подачі

від положення заслінки. Перекриття живильного отвору бункера, відрегульованого на задану величину подачі зерна, здійснювали за допомогою додаткової заслінки 15, яка встановлена над регулювальною.

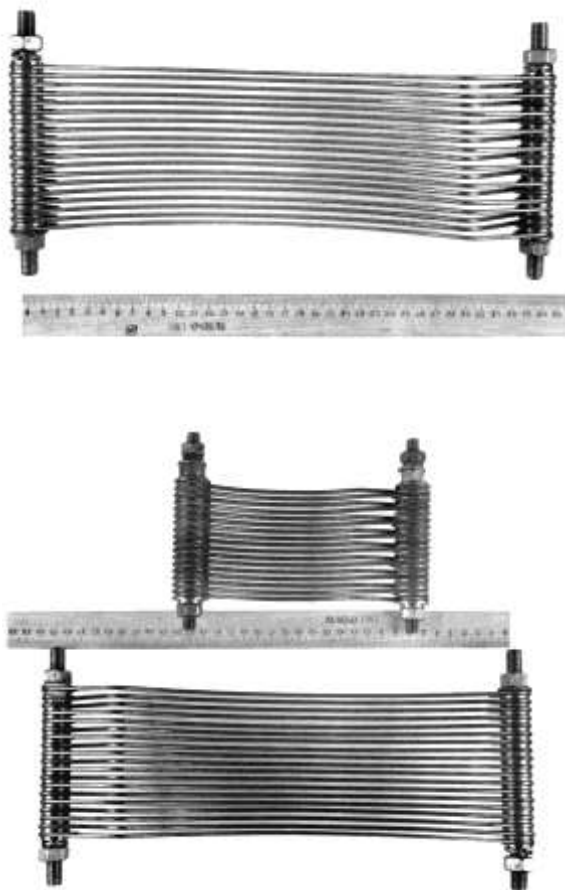


Рис. 3.5. Загальний вигляд решіт

Швидкість подачі зернового матеріалу на решето регулювали в межах від 0 до 4 м/с зміною висоти бункера. Величину робочого розміру отвору решета змінювали за допомогою регулювальних шайб. Підсів і

сход, які виділились при проході і сході з решета в пробовідбірник, зважували окремо.

3.2.2. Методика перевірки детермінованої математичної моделі руху частки по поверхні решета на адекватність

З метою перевірки адекватності детермінованої математичної моделі і правильності висновків, які зроблені на її основі, було виготовлено декілька експериментальних зразків решіт з різними радіусами R ($R=0,15; 0,3; 0,45$ м) і діаметрами прутків ($d_{np}=1,5; 3,0; 5$ мм). В табл. 3.1 приведена характеристика геометричних параметрів досліджуваних решіт. Приведені параметри решіт використовувались також для перевірки на адекватність математичної моделі, побудованої на основі елементів теорії ймовірності.

Таблиця 3.1

Геометричні параметри решіт при експериментальному дослідженні

Показники	Варіанти								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Радіус решета, м	0,15	0,15	0,15	0,3	0,3	0,3	0,45	0,45	0,45
Діаметр прутків, мм	1,5	3,0	4,5	1,5	3,0	4,5	1,5	3,0	4,5
Довжина решета, мм	250	250	250	450	450	450	700	700	700

Важливим показником ефективності виділення проходових часток по довжині решета сепаратора є інтенсивність сепарації, що характеризується критерієм Фруда

$$K = \omega^2 R / g.$$

Інтенсивність сепарації експериментально визначали відношенням кількості зерна, яке виділилось в даній зоні сепаратора, до всієї кількості зерна, що поступило в цю зону і могло пройти [3]

$$\delta = \frac{\sigma_k}{q_0 - \sum_{i=1}^{k-1} \sigma_i} \quad (3.3)$$

де σ_k - кількість зерна, яке виділилось в даній зоні; q_0 - початковий вміст часток проходових розмірів в зерні; k - номер відповідної зони.

Для цього в експериментальній установці було встановлено три рухомі перегородки (рис. 3.6), які дозволяли визначати кількість проходової фракції окремо в кожній зоні по довжині решета.

Для визначення характеру руху зерна при його подачі на решето та виході із нього використовувалась стендова апаратура на основі автономного двохкоординатного скануючого оптико-електронного датчика типу ПДС-03 (рис. 3.7) та сучасної комп'ютерної техніки [82]. Схема та загальний вигляд стенда приведений на рис. 3.8 і 3.9.

Довжина такту зчитування τ_c кожною оптронною парою датчика визначається із відношення оптимальної частоти сканування F_{onm} до кількості цих тактів N_{mc} в циклі

$$\tau_c = 1/(F_{onm} N_{mc}) = T_c / N_{mc}$$

де T_c - період одного циклу сканування всіх дискретних пар,
 $T_c = 200$ мкс.

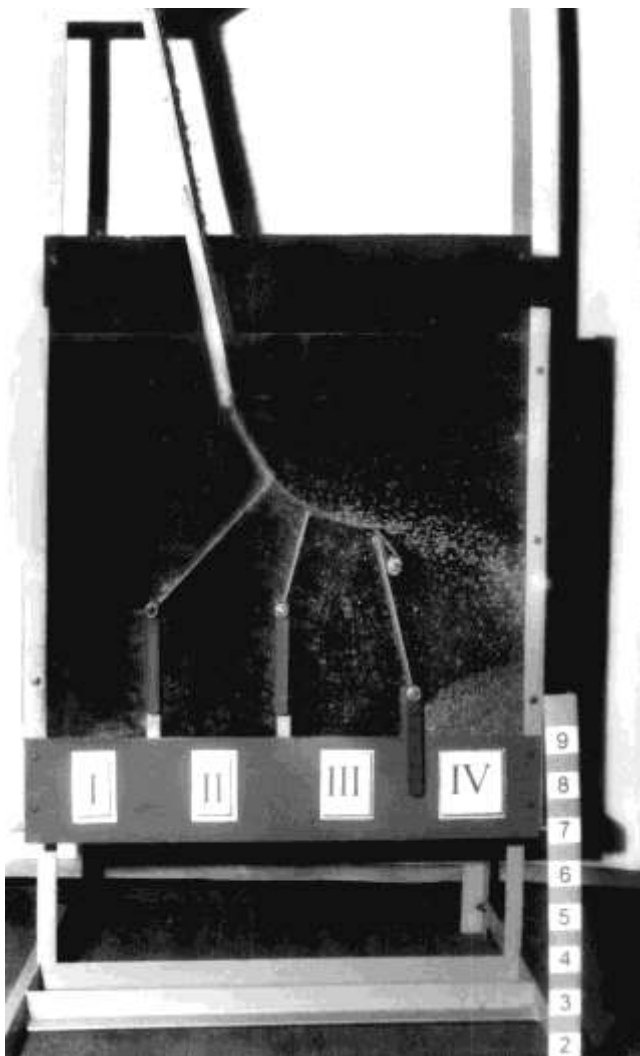


Рис. 3.6. Загальний вигляд експериментальної установки при визначенні інтенсивності сепарації по довжині решета

Оптимальна частота сканування F_{opt} визначається із співвідношення для граничних значень дослідного насіннєвого потоку:
 $F_{opt} = 1/T_c = 5 \text{ кГц}$.



Рис. 3.7. Загальний вигляд датчика типу ПДС-03

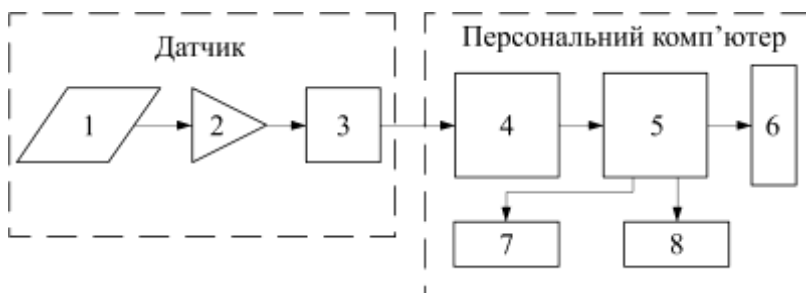


Рис.3.8. Схема стенда: 1 – датчик типу ПДС-03, 2 – підсилювачі-формувачі, 3 – вузол гістерезису, 4 – плата спряження вимірів, 5 – системний блок, 6 - принтер, 7 - клавіатура, 8 – монітор

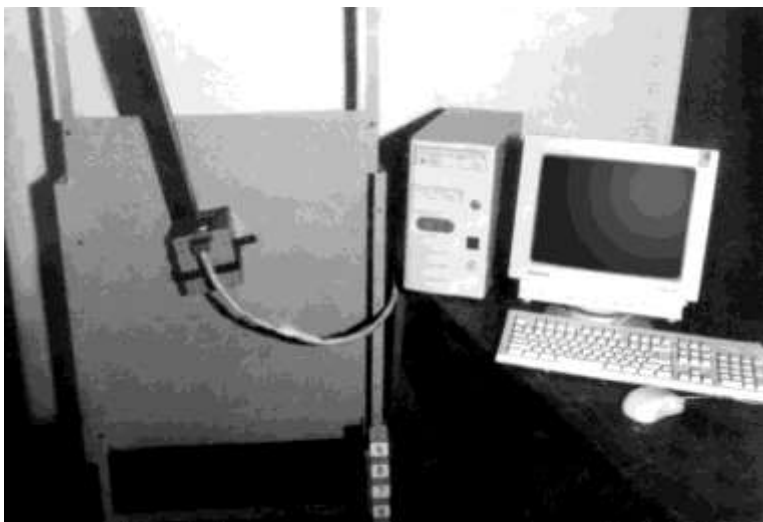


Рис. 3.9. Загальний вигляд стенда для визначення швидкості руху зерна по лотку і решету

При відомій кількості тактів зчитування N_{mc} можна визначити швидкість руху частки зерна за формулою

$$V = l / \tau_c \quad (3.4)$$

де l - довжина зерна.

3.2.3. Методика перевірки математичної моделі процесу сепарації на адекватність

Для перевірки на адекватність при прийнятих допущеннях математичної моделі процесу сепарації, побудованої на основі елементів теорії ймовірності, та вивчення закономірностей просіювання зерна через отвори решета в залежності від основних параметрів і режимів роботи використовували метод багатофакторних експериментів. Вибір факторів,

що підлягали вивченню при побудові математичної моделі процесу сепарації, базувався на даних, які були отримані на основі аналізу теоретичних досліджень та попередніх експериментів.

Ефективність роботи запропонованого решета інерційно-гравітаційного сепаратора залежить від кінематичних параметрів руху зерна, геометричних параметрів решета, величини подачі зерна, фракційного складу і його вологості.

Для оптимізації і порівняльної характеристики процесів сепарації сипких матеріалів в різних сферах їх виробництва і переробки запропоновані різними авторами десятки критеріїв [5, 12, 40, 55, 79]. Більшість із них за різними причинами не знайшли практичного використання. Головною причиною є односторонність оцінки процесу, переважно із якісної сторони без врахування показника, який характеризує процес з кількісної сторони – питомої продуктивності. Як правило, на практиці користуються двома показниками: повнотою розділення ε і питомою продуктивністю решета q . Ці показники представляються у вигляді залежності $\varepsilon = f(q)$, яка не завжди має явно виражений екстремум і тому не придатна для оптимізації процесів сепарації.

Ефективним критерієм для оцінки і оптимізації процесів сепарації може служити такий параметр, який одночасно враховує обидва технологічні показники, і взаємопов'язаний з ними прямою залежністю. Таким показником може бути питома інтенсивність просіювання, яку визначають за формулою [25]

$$P_F = \lambda \varepsilon q_F; \quad (3.5)$$

$$P_B = \lambda \varepsilon q_B, \quad (3.6)$$

де λ – коефіцієнт, який враховує розмірну характеристику зерна;

\mathcal{E} – повнота розділення зерна;

q_F , q_B – відповідно питома продуктивність одиниці площі і ширини решета.

3.2.4. Методика визначення якості роботи решіт з клиноподібною формою отворів

На решетах з клиноподібною формою отворів, розмір яких збільшуються в напрямку руху оброблюваного матеріалу, розхил прутків впливає на продуктивність сепаратора і виключає необхідність застосування додаткових пристроїв для їх очищення. Однак непостійний розмір отворів впливає на повноту виділення зерна решето сепаратора. Запропоноване решето є випадком нестандартних розмірів решіт [71]. М.Н. Летошнев для визначення повноти розділення при нестабільності розмірів решета ввів поняття середньої повноти розділення, визначаючи її за обома групами, орієнтуючись при цьому на середній розмір отворів (рис.3.10).

Нехай дано розподіл робочого розміру часток у вихідному матеріалі у вигляді варіаційної кривої P , а крива P' є розподілом часток по тому ж розміру в першій фракції. Розподіл робочого розміру отворів b на решеті можна показати у вигляді кривої M . Середній розмір позначимо b_{cp} , а величину його приймемо за основну варіанту, по якій вся сукупність як вихідного матеріалу, так і фракційних виходів розіб'ється на дві групи – I і II. Введемо позначення: нехай A_I і A_{II} - середнє відхилення від варіанти $l = b_{cp}$ I і II груп часток; A_I' і A_{II}'' - середнє відхилення (від $l = b_{cp}$)

для часток I групи, які попали в I фракцію і II групи, які потрапили в II фракцію; P_I і P_{II} - відповідно кількість часток I і II груп; P'_I і P''_{II} - кількість часток I і II груп, які виділилися в I і II фракцію

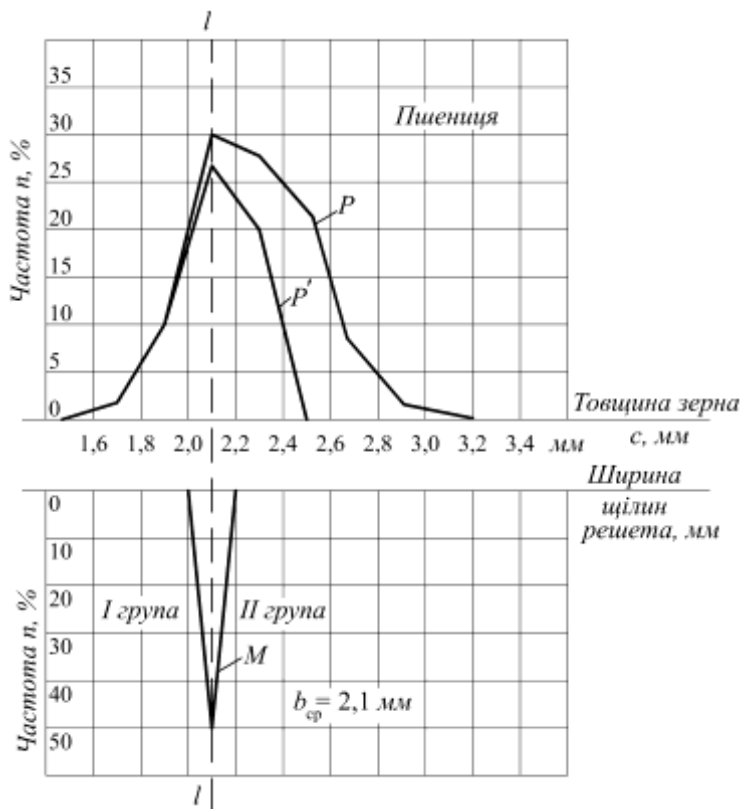


Рис. 3.10. До визначення середньої повноти розділення на решетах, повздовжні отвори яких збільшуються в бік руху оброблюваного матеріалу: P – розподіл робочого розміру часток у вихідному матеріалі; P' – розподіл часток по тому ж розміру в першій фракції; M – розподіл робочого розміру отворів решета; $b_{ср}$ – середній розмір отворів; n – частота

Звідки повнота виділення I групи

$$\varepsilon_I = \frac{A'_I P''_I}{A_I P_I}. \quad (3.7)$$

Повнота виділення II групи

$$\varepsilon_{II} = \frac{A''_{II} P''_{II}}{A_{II} P_{II}}. \quad (3.8)$$

Середню повноту розділення визначимо із наступного рівняння

$$\varepsilon P = P_I \varepsilon_I + P_{II} \varepsilon_{II},$$

де $P = P_I + P_{II}$, звідки

$$\varepsilon = \frac{P_I \varepsilon_I + P_{II} \varepsilon_{II}}{P_I + P_{II}}. \quad (3.9)$$

При повному розділенні всі частки першої групи повинні виділитися в першу фракцію ($\varepsilon_I = 1$), а всі частки другої групи – в другу фракцію ($\varepsilon_{II} = 1$). В цьому випадку і середня повнота розділення $\varepsilon = 1$, тому, що

$$\varepsilon = \frac{P_I + P_{II}}{P} = 1.$$

У випадку, коли розміри отвори решета не змінюються ($b_0 = b_k$), жодна частка другої групи не зможе виділитися в першу, тому $\varepsilon_{II} = 1$, звідки середня повнота розділення

$$\varepsilon = \frac{P_I \varepsilon_I + P_{II}}{P}. \quad (3.10)$$

Практично, щоб забезпечити відокремлення зерен з розмірами по C включно, доводиться розмір отворів брати не точно рівним C , де C -

товщина зерна, а збільшувати на деяку величину Δc так, що $b = c + \Delta c$, де Δc не повинно перевищувати величини класового проміжку.

Розглянемо граничний випадок, коли кожний із класів розподілу вихідного матеріалу ділиться в одному і тому ж співвідношенні при виході в першу і другу фракції, тобто будь-який i -й клас з частотою n_i виходить в першу фракцію в кількості $n_{1i} = \Phi_1 n_i$ і коефіцієнт Φ_1 зберігається для всіх класів від $i = 1$ до $i = m$, де m – останній клас.

Загальна кількість виходу в першу фракцію в цьому випадку визначиться за формулою

$$\sum n_{1i} = \sum \Phi_1 n_i = \Phi_1 \sum n_i, \quad (3.11)$$

або

$$P_1 = \Phi_1 P.$$

Вихід у другу фракцію визначиться за формулою

$$\sum n_{2i} = \sum (1 - \Phi_1) n_i = (1 - \Phi_1) \sum n_i, \quad (3.12)$$

або

$$P_2 = (1 - \Phi_1) P = \Phi_2 P.$$

Для цього випадку значення \mathcal{E}_I і \mathcal{E}_{II} визначимо за формулою

$$\varepsilon_I = \frac{A'_I N'_I}{A_I N_I} = \frac{\sum_I a n'_I}{\sum_I a n} = \frac{\Phi_1 \sum_I a n}{\sum_I a n} = \Phi_1, \quad (3.13)$$

де a – відхилення класового проміжку.

$$\varepsilon_{II} = \frac{A''_{II} N''_{II}}{A_{II} N_{II}} = \frac{\sum_{II} a n''_2}{\sum_{II} a n} = \frac{(1 - \Phi_1) \sum_{II} a n}{\sum_{II} a n} = (1 - \Phi_1) = \Phi_2. \quad (3.14)$$

Позначимо для даного граничного випадку повноту розділення E і отримаємо

$$E = \frac{P_I \Phi_1 + P_{II} \Phi_2}{P}. \quad (3.15)$$

З метою отримання якісного ефекту роботи решета зіставимо дійсну середню повноту розділення \mathcal{E} з повнотою E граничного випадку розподілу, а з іншого боку – з повним розділенням, коли $\mathcal{E} = 1$. Використовуючи знайдені раніше вирази (3.10) і (3.15) для \mathcal{E} і E і взявши їх різницю, отримаємо

$$\mathcal{E} - E = \frac{P_I(\mathcal{E}_I - \Phi_1) + P_{II}(\mathcal{E}_{II} - \Phi_2)}{P}. \quad (3.16)$$

З іншого боку, зіставляючи ступінь повноти розділення \mathcal{E} з тим граничним випадком, коли $\mathcal{E} = 1$, можна отримати характеристику можливої різниці в повноті розділення двох граничних випадків. Якщо в рівнянні (3.16) покласти $\mathcal{E} = \mathcal{E}_I = \mathcal{E}_{II} = 1$, будемо мати

$$1 - E = \frac{P_I(1 - \Phi_1) + P_{II}(1 - \Phi_2)}{P}.$$

Приймаючи до уваги умову $\Phi_1 + \Phi_2 = 1$, різницю між двома показниками отримаємо у такому вигляді:

$$1 - E = \frac{P_I \Phi_2 + P_{II} \Phi_1}{P}.$$

Ступінь наближення дійсного процесу розподілу до повного, який характеризує якісний ефект роботи решета, можна виразити відношенням різниць $\mathcal{E} - E$ і $1 - E$, тобто

$$\eta = \frac{\mathcal{E} - E}{1 - E} = \frac{P_I(\mathcal{E}_I - \Phi_1) + P_{II}(\mathcal{E}_{II} - \Phi_2)}{P_I \Phi_2 + P_{II} \Phi_1}. \quad (3.17)$$

Значення показника η завжди буде знаходитись в межах $0 \leq \eta \leq 1$. Нижня межа ($\eta = 0$) випадок, коли ніяких змін в якості фракцій не відбувається, а верхня межа ($\eta = 1$) відповідає повному розподілу.

3.4. Методика визначення ефекту сепарації в розробленому зерноочисному сепараторі

Технологічний ефект очищення зерна в розробленому зерноочисному сепараторі визначали за ступенем зниження вмісту домішок в зерні після очищення, а також за вмістом основного зерна у відходах.

В очищеному зерні допускається деяка частина домішок, які могли б відокремитися, а також частина тих домішок, які не відокремлюються, сукупність яких не повинна перевищувати допустимої норми по засміченості. До невідокремлюваних відносять домішки, в тому числі шкідливі, які не піддаються відокремленню робочими органами зерноочисного сепаратора.

Внаслідок недосконалості процесу сепарації у відходах може бути крім відокремлюваних домішок деяка частина повноцінного насіння культури, яка очищається. Більше зниження засміченості і менша кількість повноцінного насіння у відходах свідчать про вищий технологічний ефект сепарації. Показник технологічного ефекту сепарації від домішок, які можливо відокремити, можна визначити за формулою [95]

$$E = \frac{(\varphi_{11} - a_1)(a_1 - \varphi_{12})}{a_1(1 - a_1)(\varphi_{11} - \varphi_{12})} \quad (3.18)$$

де a_1 - вміст першого компонента у вихідному зерні в долях від одиниці;

φ_{11} - вміст першого компонента в першій фракції;

φ_{12} - вміст першого компонента в другій фракції.

Технологічний ефект сепарації в загальному вигляді оцінюють двома показниками: чистотою обох фракцій і ступенем очищення кожного компонента. Чистота першої фракції

$$\varphi_{11} = \frac{L_1 - q}{L_1} = 1 - \frac{q}{L_1} = 1 - \varphi_{21},$$

де L_1 - кількість часток першої фракції;

q - частина зерна “пересів”, яка не виділилась у другу фракцію;

φ_{21} - фактичний вміст другого компонента в першій фракції в долях від одиниці.

Чистота другої фракції

$$\varphi_{22} = \frac{L_2 - p}{L_2} = 1 - \frac{p}{L_2} = 1 - \varphi_{21},$$

де L_2 - кількість часток другої фракції.

Ступінь відокремлення першого компоненту в першу фракцію

$$\eta_{11} = \frac{\varphi_{11} W_1}{a_1},$$

де W_1 - вихід першої фракції в долях від одиниці;

a_1 - вміст першого компоненту у вихідній суміші в долях від одиниці.

Ступінь відокремлення другого компоненту у другу фракцію

$$\eta_{22} = \frac{\varphi_{22} W_2}{a_2},$$

де W_2 - вихід другої фракції в долях від одиниці;

a_2 - вміст другого компоненту у вихідній суміші в долях від одиниці.

Вихід першої фракції

$$W_1 = \frac{L_1}{Q}, \quad (3.19)$$

де Q - кількість вихідного зерна.

Вихід другої фракції

$$W_2 = \frac{L_2}{Q}. \quad (3.20)$$

Виходячи із матеріального балансу компонентів, можна записати рівняння

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{11}W_1 + \varphi_{12}W_2 &= a_1 \\ \varphi_{12}W_1 + \varphi_{22}W_2 &= a_2 \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

Після рішення системи рівнянь (3.21) отримаємо

$$W_1 = \frac{a_1 - \varphi_{12}a_2}{\varphi_{11} - \varphi_{12}^2}; \quad W_2 = \frac{\varphi_{11}a_1 - a_2}{\varphi_{11} - \varphi_{12}^2}.$$

Поділимо перше із рівнянь (3.21) на a_1 , а друге на a_2

$$\frac{\varphi_{11}W_1}{a_1} + \frac{\varphi_{12}W_2}{a_1} = 1; \quad (3.22)$$

$$\frac{\varphi_{21}W_1}{a_2} + \frac{\varphi_{22}W_2}{a_2} = 1. \quad (3.23)$$

Кожне із складових в лівих частинах рівнянь (3.22) і (3.23) є показником ступені виділення того чи іншого компоненту. Тому їх можна представити так

$$\eta_{11} + \eta_{12} = 1 \text{ і } \eta_{21} + \eta_{22} = 1.$$

Звідки

$$\eta_{11} + \eta_{12} = \eta_{21} + \eta_{22}. \quad (3.24)$$

Виходячи із рівняння (3.24) критерій технологічного ефекту сепарації двокомпонентної суміші можна визначити за формулою

$$E = \eta_{11} - \eta_{21} = \eta_{11} + \eta_{22} - 1 = \eta_{22} - \eta_{12}. \quad (3.25)$$

Формулу (3.25) можна використати для оцінки ефекту очищення насіння в тих випадках, коли в якості одного із компонентів мають на увазі “відокремлювані” домішки в даному сепараторі. Компонент відокремлювані домішки може складатися із сміття і зернових домішок, а також насіння культури, які за прийнятою ознакою розділення відносяться

до цього компоненту. Якщо в результаті сепарації всі компоненти будуть виділені в окрему фракцію, то згідно формулі (3.25) технологічний ефект сепарації буде дорівнювати одиниці. З урахуванням вище приведеного, формулу (3.19) можна записати у вигляді

$$E = W_1 \frac{\varphi_{11} - a_1}{a_{11} - a_1} + W_2 \frac{\varphi_{22} - a_2}{a_{22} - a_2} \quad (3.26)$$

Таким чином, формула (3.26) дозволяє оцінювати результати можливих випадків сепарації двокомпонентної суміші на дві фракції.

Якщо взяти до уваги те, що кожна із складових формули (3.26) – це добуток кількісного ефекту W_i на якісний ефект фракції $\left(\frac{\varphi_{ii} - a_i}{a_{ii} - a_i}\right)$, то при n фракціях буде n складових, які характеризують частковий ефект сепарації кожної із фракцій.

Загальний технологічний ефект сепарації компонентної суміші на n фракцій можна записати у вигляді

$$E_n = \sum_{i=1}^n W_i \frac{\varphi_{ii} - a_i}{a_{ii} - a_i} \quad (3.27)$$

де W_i - вихід i -ї фракції;

φ_{ii} - чистота i -ї фракції;

a_i - вміст i -го компоненту у вихідному зерні.

4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОЦЕСУ СЕПАРАЦІЇ В ІНЕРЦІЙНО-ГРАВІТАЦІЙНОМУ СЕПАРАТОРІ

4.1. Фізико-механічні властивості зерна

4.1.1. Коефіцієнти тертя зерна

Отримані значення коефіцієнтів тертя зерна при вивченні впливу швидкості ковзання на коефіцієнти тертя зерна по дерев'яній та металевій робочій поверхні (табл.4.1).

Таблиця 4.1

Коефіцієнти тертя зерна в залежності від швидкості ковзання

Поверхня тертя	Швидкість ковзання зерна, м/с					
	1,2	2	3	4	5	9,7
Сталь	0,35	0,35	0,36	0,36	0,37	0,37
Дерево	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,29

Аналіз приведених в табл. 4.1 даних показує, що зміна швидкості ковзання зерна по неперфорованій поверхні в досліджуваному діапазоні практично суттєво не впливає на величину коефіцієнта зовнішнього тертя.

Значення коефіцієнтів тертя зерна (для насіння пшениці “Скіфянка”), отримані на суцільній сталевій поверхні при різній вологості (табл. 4.2). Дані показують, що із збільшенням вологості зерна його коефіцієнт тертя також збільшується. При цьому динамічні коефіцієнти тертя для рівнозначної вологості постійно залишаються меншими по величині, ніж статичні.

Дані, отримані при вивченні впливу тиску зерна на неперфоровану робочу поверхню сталевого циліндра (табл. 4.3) показують, що із збільшенням тиску зерна на робочу неперфоровану поверхню його коефіцієнт тертя збільшується.

Таблиця 4.2

Значення коефіцієнтів тертя при різній вологості

Вологість зерна, %	11,4	12,7	14,2	15,9	17,7
Статичний коефіцієнт тертя	0,424	0,433	0,433	0,477	0,565
Динамічний коефіцієнт тертя	0,353	0,361	0,369	0,397	0,491

Таблиця 4.3

Зміна коефіцієнта тертя зерна від тиску на
неперфоровану робочу поверхню

Величина тиску, Па	60	90	150	240
Число шарів зерна	2	3	5	7-8
Значення коефіцієнта тертя	0,438	0,448	0,462	0,509

4.1.2. Фракційний склад зерна

В якості оброблюваного матеріалу при дослідженні процесу сепарації використовували пшеницю "Скіф'янка". Основні досліді по вивченню просіювання виконували на колосовому та підсівному решетах з радіусом $R=300$ мм і робочими розмірами: для колосового решета $b_0 = 3,5$ мм, $b_k = 4,0$ мм, для підсівного решета $b_0 = 1,8$ мм, $b_k = 2,0$ мм. Ширина решіт в кожному випадку залишалась постійною і складала $B_p = 100$ мм. При дослідженні використовували зерно нормальної вологості з вихідним вмістом підсіву від 3 до 22 % і засмічене до 4% крупними домішками (подрібненими колосками, соломкою довжиною 10–50 мм, головками бур'янів), в якості крупних домішок використовували також насіння кукурудзи. Підсів включав дрібні і биті зерна основної культури та інші природні домішки зерна, отриманого із бункера комбайна і попередньо обробленого повітряним потоком в аспіраційній колонці для виділення легких домішок і пилу. При вологості 14-16% маса 1000 зерен складала

33,15 г, натурна маса 805,31 г/л. В дослідях використовували зерно з гранулометричним складом (табл. 4.4).

Таблиця 4.4

Гранулометричний склад зерна

Розмір отворів, мм	3,5x20	3x20	2,5x20	2,2x20	2,0x20	1,7x20	1,5x20	1,2x20	Дно
Залишок на решеті, %	21,2	34,6	16,4	11,3	6,3	4,2	1,6	2,3	2,1

Вихідна маса зерна складала 5 кг. Потім зерно пропускали через лабораторну установку і розділяли на дві фракції. Кількість повторювань – трикратна. Зважування зерна виконували за допомогою вагів ВЛКТ–500г–М, похибка яких складає $1 \cdot 10^{-3}$ кг. Розмір отворів решіт в кожному випадку визначався на основі аналізу гранулометричного складу зерна.

4.2. Експериментальна перевірка детермінованої математичної моделі на адекватність

З метою перевірки адекватності детермінованої математичної моделі і правильності висновків, які зроблені на її основі, були проведені два етапи експериментальних досліджень на експериментальній установці з решетами по варіантах II, VI, IX (табл.3.1). На першому етапі вивчалась залежність нелінійної функції $V = V(\Theta)$. Задача другого етапу полягала у визначенні інтенсивності просіювання на лабораторній установці, яку визначали за формулою (3.3) і порівнювали з інтенсивністю сепарації, яку розраховували за формулою (2.31).

Для реалізації досліджень на першому етапі використовували частку циліндричної форми діаметром 3 мм і довжиною 5 мм. Коефіцієнт тертя ковзання по металевій поверхні $f = 0,36$. Швидкість її руху визначали за

методикою, приведеною в п.3.3.2. Графічне зображення результатів експериментів (рис.4.1).

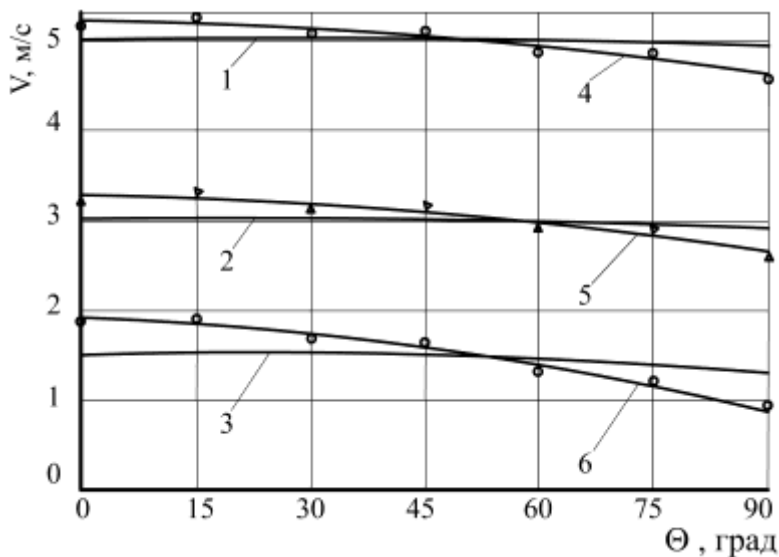


Рис.4.1. Співставлення теоретичних і експериментальних значень швидкості руху часток: $R = 300$ мм, 1, 4 – $V_0 = 5$ м/с; 2, 5 – $V_0 = 3$ м/с; 3, 6 – $V_0 = 1,5$ м/с; 1, 2, 3 – теоретичні, 4, 5, 6 – експериментальні

Проведення другого етапу досліджень виконували на зерновому воросі пшениці “Скіф’янка”, гранулометричний склад якої (табл. 4.4).

Аналіз отриманих залежностей (рис. 4.2.) показує, що швидкість руху частки, яка отримана із математичної моделі і експериментально, відрізняється не суттєво, характер зміни інтенсивності просіювання, приведений на рис. 4.2 і 2.10 подібні. Таким чином, результати експериментальних досліджень підтвердили адекватність математичної моделі (2.31), аналіз якої дозволяє отримати достатньо повну картину основних особливостей процесу інерційно-гравітаційного сепарації на решетах, повздовжні отвори яких розширюються в напрямку руху зерна.

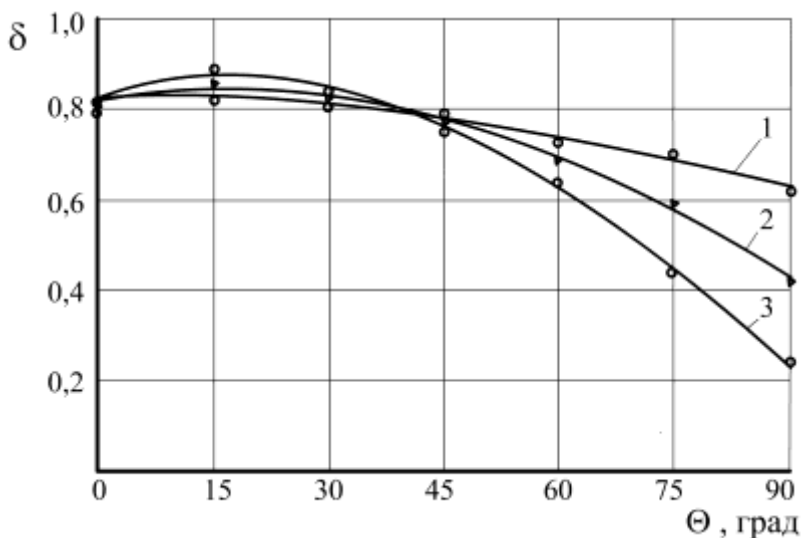


Рис. 4.2. Зміна інтенсивності просіювання по довжині решета:

$V_0 = 4$ м/с, $b_0 = 1,8$ мм, $b_k = 2,0$ мм, 1 – $R = 150$ мм, 2 – $R = 300$ мм, 3 –
 $R = 450$ мм

4.3. Експериментальна перевірка математичної моделі процесу сепарації на адекватність

Характерною особливістю ймовірних математичних моделей по відношенню до детермінованих є можливість прогнозування повноти виділення прохідової фракції. На основі цього для оцінки адекватності ймовірної математичної моделі реальному процесу, прийнято співставлення розрахункових і експериментально отриманих залежностей ефективності виділення прохідових часток від питомого навантаження. Експериментальна оцінка перевірки адекватності математичної моделі процесу сепарації, побудованої на основі елементів теорії ймовірності, та встановлення закономірності просіювання через решета в залежності від

основних параметрів і режимів роботи виконувалась на основі методів багатофакторних експериментів.

Досліджуваний технологічний процес роботи решета сепаратора (рис.2.1) може бути представлений у вигляді прямокутника (рис.4.3).

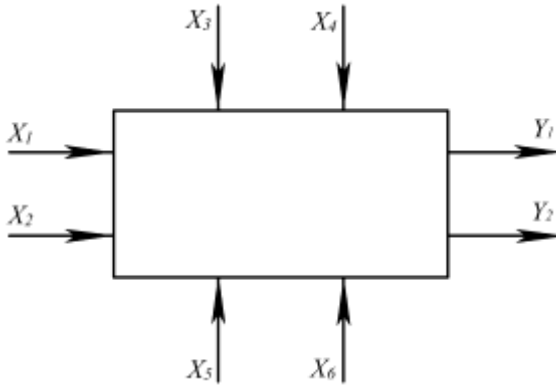


Рис. 4.3. Умовна схема досліджуваного технологічного процесу

Фактори, які впливають на проходження процесу, показані у вигляді стрілок, які входять в об'єкт, і позначені “ X ” з відповідним індексом. Стрілки, які виходять із об'єкта, відповідають параметрам оптимізації.

В схемі досліджуваного технологічного процесу були прийняті такі позначення:

X_1 – кут розхилу прутків (α);

X_2 – діаметр прутків (d_{np});

X_3 – показник кінематичного режиму руху зерна ($K = \frac{\omega^2 R}{g}$);

X_4 – параметр, який характеризує відносний вміст домішок у вихідному матеріалі (Φ);

X_5 – вологість зерна (W);

X_6 – питоме навантаження на решето (q_B);

Y_1 – повнота розділення зерна (\mathcal{E});

Y_2 – питома інтенсивність просіювання зерна (II_B).

Вибір конкретних параметрів варіювання факторів, їх кількість, а також рівні зміни факторного простору обґрунтовувались за результатами розрахунків і попередніх експериментальних досліджень. Інтервали варіювання і основні рівні факторів (табл.4.5). Інтервали варіювання факторів визначалися можливостями лабораторної установки і факторним простором, який має місце в реальних умовах. Основний рівень і інтервали варіювання X_1 вибирались із умови: нижній рівень (–) - розсув прутків відсутній; верхній рівень (+) - розсув відповідає ширині отвору в кінці решета величині класового проміжку.

Таблиця 4.5

Інтервали варіювання і рівні факторів

Умови планування	Фактори					
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
	α , град	d_{np} , мм	K	Φ , %	W , %	q_B , кг/м·с
Основний рівень		3	6	10	16	7
Інтервал варіювання		1,5	4	5	2	5
Верхній рівень	+	4,5	10	15	18	12
Нижній рівень	–	1,5	2	5	14	2

Основний рівень і інтервали варіювання X_2 вибирались із умови жорсткості решета та на основі аналізу математичних моделей процесу

сепарації. Верхній рівень X_3 вибирали із можливостей лабораторної установки і завантажувального пристрою та теоретичних досліджень. Нижній і верхній рівні X_4 і X_5 вибирали із характеристик післякомбайнового зерна [95]. Інтервали варіювання і основний рівень X_6 вибирали із можливостей лабораторної установки і на основі теоретичних досліджень. Для виконання поставленої задачі використовувався метод планування факторних експериментів для шести факторів (Na_6) [26, 74]. Матриця планування серій експериментів та розрахунок дисперсій відтворюваності і залишкової суми дисперсій (табл. 4.6-4.7). В усіх точках плану проведено по 3 паралельних досліди. Перед початком експерименту фактори кодуються. При кодуванні факторів здійснюється лінійне перетворення факторного простору з перенесенням початку координат в центр експерименту і вибір масштабу по осях в одиницях вимірювання факторів [74]. Кодування факторів виконуємо за формулою

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{v}, \quad (4.1)$$

де x_i – кодоване значення фактора, верхній рівень (+1), а нижній (-1), в центрі експерименту нульовий рівень; X_i – натуральне значення фактора в його розмірності; X_{0i} – натуральне значення фактора на нульовому рівні; v – натуральне значення інтервалу варіювання фактора

$$v = \frac{X_i^B - X_i^H}{2}, \quad (4.2)$$

Таблиця 4.6

Матриця планування і результати експериментів

№ дослідку	Кодоване значення факторів						Значення функції відгуку
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	Y
1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	-	-	-	+	+	0,384
2	-	-	-	+	-	+	0,282
3	-	-	+	-	-	+	0,356
4	-	-	+	+	+	+	0,301
5	-	+	-	-	+	-	0,202
6	-	+	-	+	-	-	0,393
7	-	+	+	-	-	-	0,412
8	-	+	+	+	+	-	0,274
9	+	-	-	-	+	-	0,364
10	+	-	-	+	-	-	0,293
11	+	-	+	-	-	-	0,334
12	+	-	+	+	+	-	0,325
13	+	-	-	-	+	+	0,193
14	+	+	-	+	-	+	0,186
15	+	+	+	-	-	+	0,256
16	+	+	+	+	+	+	0,351
17	0	0	0	0	0	0	0,721
18	+	0	0	0	0	0	0,392
19	-	0	0	0	0	0	0,217
20	0	+	0	0	0	0	0,486
21	0	-	0	0	0	0	0,782
22	0	0	+	0	0	0	0,734
23	0	0	-	0	0	0	0,201
24	0	0	0	+	0	0	0,745
25	0	0	0	-	0	0	0,693
26	0	0	0	0	+	0	0,492
27	0	0	0	0	-	0	0,534
28	0	0	0	0	0	+	0,453
29	0	0	0	0	0	-	0,832

Таблиця 4.7

Розрахунок дисперсій відтворюваності і залишкової суми дисперсій

№ п/ п	Y_1	Y_2	Y_3	\bar{Y}	S_u^2	Y_u^*	$(\bar{Y} - Y_u^*)^2$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,381	0,389	0,382	0,384	$3,8 \cdot 10^{-5}$	0,382	$4,818 \cdot 10^{-4}$
2	0,274	0,280	0,292	0,282	$1,68 \cdot 10^{-4}$	0,289	$3,202 \cdot 10^{-3}$
3	0,351	0,369	0,348	0,356	$2,58 \cdot 10^{-4}$	0,374	0,014
4	0,299	0,305	0,299	0,301	$2,4 \cdot 10^{-5}$	0,311	0,012
5	0,196	0,205	0,205	0,202	$5,4 \cdot 10^{-5}$	0,201	0,040
6	0,391	0,398	0,390	0,393	$3,8 \cdot 10^{-5}$	0,379	$2,066 \cdot 10^{-4}$
7	0,410	0,415	0,411	0,412	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0,414	0,010
8	0,280	0,269	0,273	0,274	$6,2 \cdot 10^{-5}$	0,281	0,031
9	0,361	0,366	0,365	0,364	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0,389	$1,219 \cdot 10^{-3}$
10	0,293	0,295	0,291	0,293	$8,0 \cdot 10^{-6}$	0,275	$6,799 \cdot 10^{-3}$
11	0,331	0,337	0,334	0,334	$1,8 \cdot 10^{-5}$	0,311	0,031
12	0,329	0,321	0,325	0,325	$3,2 \cdot 10^{-5}$	0,348	0,015
13	0,201	0,192	0,186	0,193	$1,14 \cdot 10^{-4}$	0,182	0,022
14	0,185	0,101	0,272	0,186	0,015	0,183	0,014
15	0,254	0,259	0,255	0,256	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0,254	0,039
16	0,353	0,349	0,351	0,351	$8,0 \cdot 10^{-6}$	0,391	$1,638 \cdot 10^{-3}$
17	0,720	0,724	0,719	0,721	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0,717	0,099
18	0,390	0,397	0,389	0,392	$3,8 \cdot 10^{-5}$	0,397	$2,294 \cdot 10^{-5}$
19	0,218	0,221	0,212	0,217	$4,2 \cdot 10^{-5}$	0,216	0,040
20	0,487	0,489	0,482	0,486	$2,6 \cdot 10^{-5}$	0,487	$6,307 \cdot 10^{-3}$
21	0,745	0,817	0,814	0,782	$7,8 \cdot 10^{-5}$	0,795	0,088
22	0,731	0,733	0,738	0,734	$2,6 \cdot 10^{-5}$	0,753	0,079
23	0,208	0,199	0,196	0,201	$7,8 \cdot 10^{-5}$	0,361	0,025
24	0,710	0,799	0,706	0,745	$6,2 \cdot 10^{-5}$	0,747	0,089
25	0,687	0,701	0,691	0,693	$1,04 \cdot 10^{-4}$	0,688	0,070
26	0,495	0,491	0,490	0,492	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0,497	$9,067 \cdot 10^{-3}$
27	0,531	0,537	0,534	0,534	$1,8 \cdot 10^{-5}$	0,516	0,014
28	0,452	0,459	0,448	0,453	$6,2 \cdot 10^{-5}$	0,478	$5,572 \cdot 10^{-3}$
29	0,833	0,839	0,824	0,832	$1,14 \cdot 10^{-4}$	0,843	0,036

де X_i^B – значення фактора на верхньому рівні; X_i^H – значення фактора на нижньому рівні.

Значення величини Y ефективності сепарації підсівного решета розраховані згідно алгоритму розрахунку факторних експериментів і приведені в табл.4.7.

Коли невідомий механізм проходження процесу в “чорному ящику”, аналітичний вираз функції відгуку також невідомий. Тому описуємо функцію відгуку рівнянням регресії виду [74]

$$Y = b_0 + \sum_{i < j}^n b_i X_i + \sum_{i > 1}^n b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} X_i^2, \quad (4.3)$$

де Y – розрахункове значення критерію оптимізації; X_i , X_j – незалежні змінні; b_0, b_i, b_{ij} - коефіцієнти полінома.

Ступінь впливу кожної змінної на величину функції Y оцінюється коефіцієнтами поліному, які визначаються методами регресійного аналізу на основі ідей планування факторного експерименту [74]. Після реалізації матриці експерименту розраховуємо коефіцієнти регресії моделі (4.3)

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N \bar{Y}_u, \quad (4.4)$$

де \bar{Y}_u – значення критерію оптимізації в u -тому досліді;

N – кількість дослідів (число строчок в матриці експерименту).

Коефіцієнт b_i визначали за формулою

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} \bar{Y}_u, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n, \quad (4.5)$$

де x_{iu} – значення фактора x_i в u -тому досліді.

Коефіцієнт b_{ij} визначали за формулою

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} \bar{Y}_u, \quad j=0, 1, 2, \dots, n, \quad (4.6)$$

де x_{iu} і x_{ju} – значення двох факторів u -тому досліді.

Дисперсію відтворюваності розраховували за формулою

$$S_u^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (Y_{uk} - \bar{Y}_u)^2, \quad (4.7)$$

де m – число паралельних дослідів в кожній точці плану;

k – кількість факторів;

Y_{uk} – зміна стану в паралельних дослідях;

u – номер точки.

Оцінку однорідності відтворюваності виконуємо за допомогою критерію Кохрена. Розрахункове значення критерію визначається за формулою

$$G_{розр} = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^N S_u^2}, \quad (4.8)$$

де $S_{u \max}^2$ – максимальна із розрахованих построчкових дисперсій

відтворюваності; $\sum_{u=1}^N S_u^2$ – сума дисперсій відтворюваності для строчок

матриці планування.

Розрахункове і табличне значення критерію Кохрена дорівнюють

$$G_{розр} = 1,103; \quad G_{табл.(2,29)_{0,05}} = 1,745.$$

Тут $G_{розр} < G_{табл}$, тому підтверджується гіпотеза про однорідність построкових дисперсій відтворюваності. Це дозволяє їх усереднити і розрахувати похибку досліду S_0^2 за формулою

$$S_0^2 = \frac{1}{N} \sum S_u^2; \quad S_0^2 = 0,00054.$$

Коефіцієнти рівняння регресії отримані в результаті розрахунку:
 $b_0 = 0,62$; $b_1 = 0,019$; $b_2 = -0,03$; $b_3 = 0,015$; $b_4 = -0,011$; $b_5 = -0,008$;
 $b_6 = -0,014$; $b_{12} = 0,009$; $b_{13} = +0,0093$; $b_{14} = 0,0064$; $b_{15} = 0,0039$;
 $b_{16} = 0,0088$; $b_{23} = -0,0141$; $b_{24} = 0,0013$; $b_{25} = -0,0071$; $b_{26} = -0,0092$;
 $b_{34} = -0,0021$; $b_{35} = 0,0038$; $b_{36} = -0,0089$; $b_{45} = -0,0017$; $b_{46} = -0,0042$;
 $b_{56} = -0,0053$; $b_{11} = 0,00014$; $b_{22} = -0,007$; $b_{33} = 0,0048$; $b_{44} = -0,001$;
 $b_{55} = -0,0012$; $b_{66} = -0,0023$.

Значимість отриманих коефіцієнтів рівняння регресії визначали порівнянням їх величин з довірчим інтервалом $|b_i| > |\Delta b_i|$, де b_i – величина коефіцієнта регресії; Δb_i – величина довірчого інтервалу. Довірчий інтервал Δb_i визначали за формулою

$$\Delta b_i = \pm t_{табл} S_{bi}, \quad (4.9)$$

де $t_{табл(29)_{0,05}} = 2,045$ – табличне значення критерію Стюдента;

S_{bi} – середньоквадратичне відхилення i -го коефіцієнта регресії, яке визначали за формулою

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{S_0^2}{N}}. \quad (4.10)$$

З урахуванням значень $t_{табл}$ і S_{bi} величина довірчого інтервалу має значення $\Delta b_i = 0,00879$. Рівняння регресії на основі отриманих розрахунків для дрібних домішок

$$Y = 0,62 + 0,019X_1 - 0,03X_2 + 0,015X_3 - 0,011X_4 - 0,014X_6 + \\ + 0,009X_1X_2 + 0,0093X_1X_3 + 0,0088X_1X_6 - 0,0141X_2X_3 - \\ - 0,0092X_2X_6 - 0,0089X_3X_6 \quad (4.11)$$

Перевіряємо адекватність моделі за допомогою критерію Фішера

$$F_{розр} = \frac{S_{ад}^2}{S_0^2} \leq F_{табл(0,05; f_{ад}; f_y)},$$

де $F_{розр}$ – розрахункове значення критерію Фішера; $S_{ад}^2$ – дисперсія адекватності; $F_{табл(0,05; f_{ад}; f_y)}$ – табличне значення критерію Фішера при 5% рівні значущості; $f_{ад}$ – число ступенів вільності дисперсії адекватності; f_y – число ступенів вільності дисперсії відтворюваності.

Дисперсію адекватності $S_{ад}^2$ визначаємо за формулою

$$S_{ад}^2 = \frac{1}{N - (k + 1)} \sum_{u=1}^N (\bar{Y}_u - Y_u^*)^2,$$

де N – кількість строчок в матриці планування; k – кількість факторів; \bar{Y}_u – середньоарифметичне значення функції відгуку в паралельних дослідках; Y_u^* – розрахункове значення функції відгуку.

Підставляємо значення членів, які входять в формулу для розрахунку дисперсії адекватності, отримаємо $S_{ad}^2 = 0,00077$. Розрахункове значення критерію Фішера $F_{розра}(9;28;0,05) = 1,42$, $F_{табл}(9;28;0,05) = 1,71$. Тут $F_{розра} < F_{табл}$, тому отримане рівняння адекватно описує ефективність процесу сепарації для прийнятого інтервалу варіювання факторів.

Аналогічно отримане рівняння регресії для відокремлення крупних домішок

$$Y_1 = 0,48 + 0,021X_1 - 0,02X_2 + 0,017X_3 - 0,014X_4 - 0,012X_6 + \\ + 0,009X_1X_2 - 0,0094X_1X_3 - 0,0089X_1X_6 - 0,0151X_2X_3 - \\ - 0,0095X_2X_6 - 0,0088X_3X_6 \quad . \quad (4.12)$$

Із аналізу рівнянь регресії можна зробити висновок про вплив факторів, які вивчаються. В числі значимих факторів виявилися кут розхилу прутків у поперечному перерізі α , діаметр прутків $d_{пр}$, показник кінематичного режиму K , фракційний склад оброблюваного матеріалу Φ , питоме навантаження зерна на одиницю ширини решета q_B . Аналіз цих факторів показує, що оптимізація процесу по фракційному складу не має значення, бо це протирічить призначенню процесу. Тому в подальшому цей фактор був стабілізований на верхньому рівні, тобто $\Phi = 15\%$ для дрібних домішок і $\Phi = 4\%$ для крупних домішок. Аналіз отриманих рівнянь показує, що збільшенню ефективності сепарації сприяє підвищення показника кінематичного режиму K та верхній рівень кута розсуву прутків у поперечному перерізі α , підвищення інших факторів приводить до її зменшення. Взаємодія парних факторів показує, що ефективність підвищується, коли α і K знаходяться на верхніх рівнях, всі інші на різних рівнях.

Рішення задачі здійснювалось через параметр приведеної питомої інтенсивності просіювання Π . В даних інтервалах варіювання факторів максимальне значення Π досягається при показникові кінематичного режиму $K = 4 \dots 6$ (радіус решета $R = 0,2 \dots 0,4$ м) для дрібних домішок і $K = 3 \dots 5$ (радіус решета $R = 0,3 \dots 0,5$ м) для крупних домішок. В інших випадках він зменшується, бо при швидкості $V = 4$ м/с (із умови забезпечення швидкості у завантажувальному пристрої) збільшення K відбувається за рахунок збільшення радіусу решета R , що приводить до заклинення або зупинки часток зерна.

Аналіз технологічної схеми роботи сепаратора та графічних залежностей (рис.4.4) показує, що збільшення показника кінематичного режиму K при підвищенні питомого навантаження за рахунок збільшення швидкості при постійному радіусі решета приводить до збільшення втрат повноцінного зерна у відходи на колосовому решеті. Підвищення K на підсівному решеті хоч і не приводить до втрат зерна, але при цьому погіршується якість очищення.

Збільшення швидкості у завантажувальному пристрої приводить до збільшення габаритів машини. Ефективним рішенням може бути застосування додаткових пристроїв для збільшення швидкості руху зерна при малих габаритних розмірах.

Для експериментальної перевірки адекватності математичної моделі, побудованої на основі елементів теорії ймовірності виконано порівняння теоретичних залежностей (рис.2.18) з експериментальними при тих же умовах (рис.4.5). Розходження між теоретичними і експериментальними даними не перевищують 6,2%, на основі чого можна зробити висновок про адекватність отриманих залежностей.

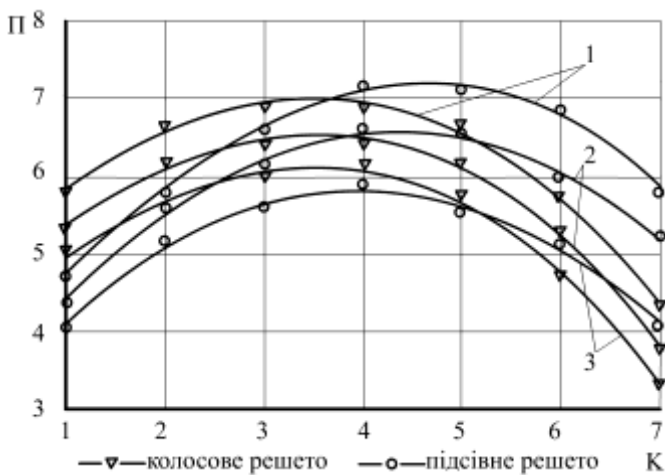


Рис. 4.4. Зміна питомої інтенсивності просіювання Π в залежності від показника кінематичного режиму K : 1 — $q_B = 6,4$ т/м год; 2 — $q_B = 10,4$ т/м·год; 3 — $q_B = 18$ т/м год

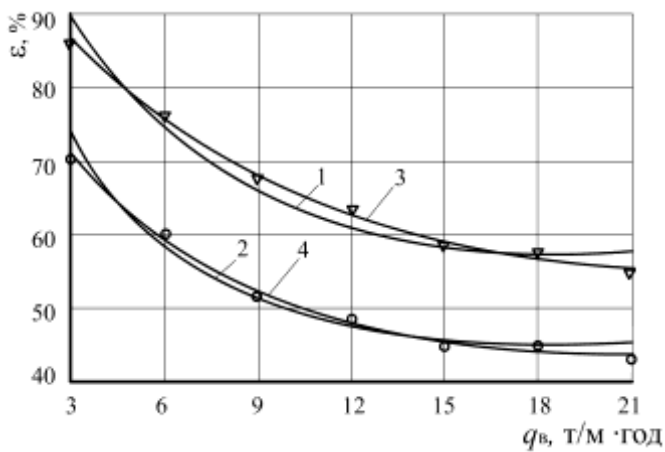


Рис. 4.5. Співставлення теоретичних і експериментальних значень повноти виділення ε від питомого навантаження q_B : $R = 300$ мм, $V_0 = 4$ м/с,

$$d_{np} = 3,0 \text{ мм}; f = 0,35, b_0 = 1,8 \text{ мм}, b_k = 2,0 \text{ мм};$$

1, 3 — $d_e = 1,2$ мм, 2, 4 — $d_e = 1,8$ мм, 1, 2 — теоретичні,
3, 4 — експериментальні

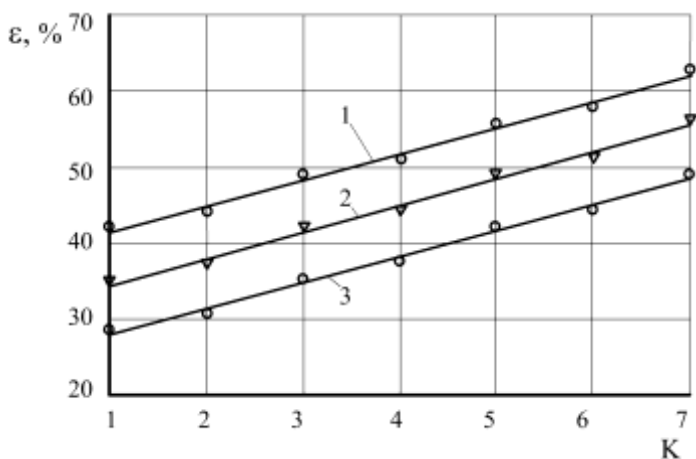
4.4. Експериментальна оцінка технологічних можливостей інерційно-гравітаційного сепаратора

Для оцінки технологічних можливостей запропонованого інерційно-гравітаційного сепаратора були проведені дослідження з метою виявлення впливу на ефективність сепарації вологості зернового матеріалу, сепарації різних видів зернових сумішей, які відрізняються як вмістом смітних домішок, так і фізико-механічними властивостями. Основними елементами експериментальної установки були такі, як і при дослідженні адекватності математичних моделей. Для підвищення ефективності виділення крупних домішок при мінімальних втратах повноцінного зерна у відходи були також проведені дослідження на решетах з розмірами отворів в кінцевій частині більше величини класового проміжку.

4.4.1. Вплив вологості на ефективність сепарації

Визначення впливу вологості зерна на просіювання крізь отвори решета виконували при виділенні як дрібних так і крупних домішок. На рис. 4.6-4.7 представлені графіки залежності повноти виділення домішок із зерна при різних значеннях вологості від показника кінематичного режиму.

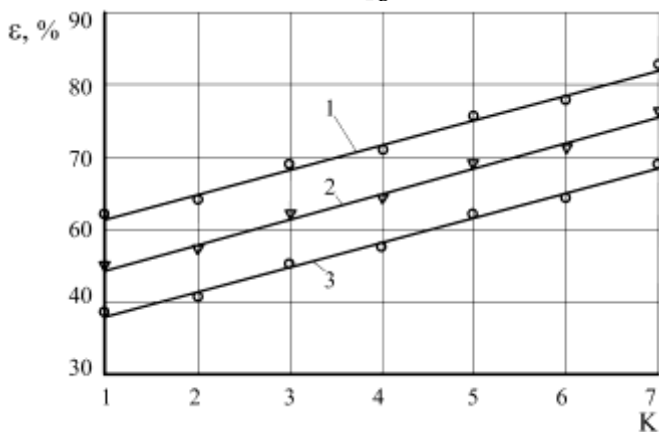
Аналіз отриманих залежностей свідчить про те, що при більших значеннях вологості ефективність сепарації знижується як дрібних так і крупних домішок. Менші значення ефективності сепарації дрібних домішок пояснюються тим, що підвищення вологості впливає на коефіцієнт тертя часток по поверхні решета, внаслідок чого зменшується їх швидкість, що приводить до гальмування і порушення орієнтації відносно отворів. Крупні домішки сходять з решета, тому немає необхідності орієнтувати їх відносно отворів і, як наслідок, ефективність їх виділення вище.



1 – $W = 14\%$, 2 – $W = 16\%$, 3 – $W = 18\%$

Рис. 4.6. Залежність ефективності сепарації дрібних домішок від показника кінематичного режиму K при різних значеннях вологості

зерна W : $R = 0,3$ м, $q_B = 2,75$ т/м·год



1 – $W = 14\%$, 2 – $W = 16\%$, 3 – $W = 18\%$

Рис. 4.7. Залежність ефективності сепарації крупних домішок від показника кінематичного режиму K при різних значеннях вологості

зерна W : $R = 0,3$ м, $q_B = 2,75$ т/м·год

Приведені залежності повноти виділення дрібних та крупних домішок (рис.4.8-4.9) при різних значеннях питомого навантаження на одиницю ширини решета показують, що при підвищенні питомого навантаження при високій вологості, як для дрібних так і для крупних домішок, ефективність сепарації погіршується. Погіршення ефективності сепарації в даному випадку пояснюється тим, що при підвищенні вологості зерна змінюється коефіцієнт внутрішнього тертя, який впливає на його рухомість і погіршує проходження прохідних часток із верхніх шарів до решета, внаслідок чого вони не встигають виділитися через решето.

Виділення крупних домішок не значно залежить від вологості, але при цьому зростають втрати повноцінного зерна у відходи. Аналіз проведених досліджень показує, що при збільшенні вологості процес сепарації необхідно виконувати при менших значеннях питомого навантаження.

4.4.2. Вплив засміченості на ефективність сепарації

Вплив засміченості зерна на ефективність сепарації визначали при різних режимах роботи решета і питомих навантаженнях. Залежності повноти виділення домішок при різних значеннях питомого навантаження (вміст дрібних домішок 5, 10, 15%), (рис. 4.10).

Із графічних залежностей видно, що із збільшенням кількості смітних домішок ефективність виділення дрібної фракції зменшується, тому при більшій засміченості процес необхідно вести при менших навантаженнях і більших швидкостях, що сприяє розтягуванню шару зерна і підвищує ймовірність виділення дрібних домішок.

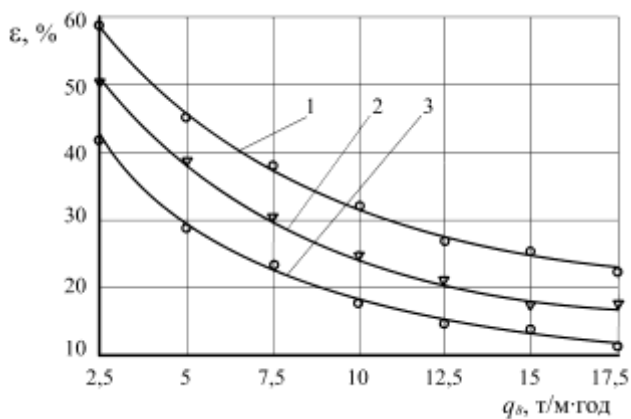


Рис. 4.8. Залежність ефективності сепарації дрібних домішок від питомого навантаження при різних значеннях вологості W : $R=0,3$ м, $K=6$, 1 – $W=14\%$, 2 – $W=16\%$, 3 – $W=18\%$

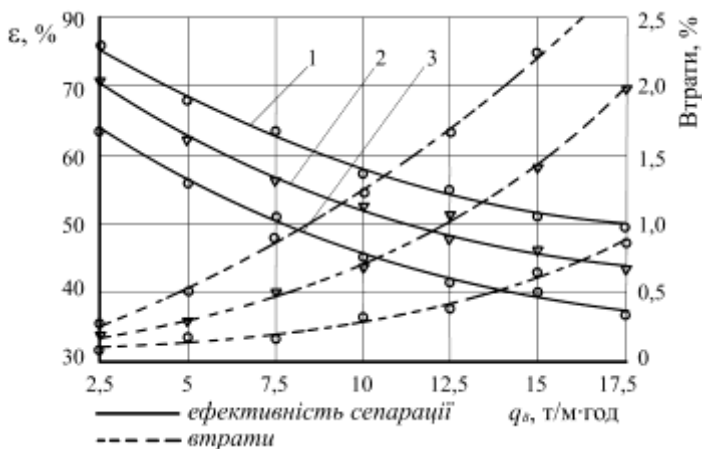


Рис. 4.9. Залежність ефективності сепарації крупних домішок від питомого навантаження при різних значеннях вологості W : $R=0,3$ м, $K=5$, 1 – $W=14\%$, 2 – $W=16\%$, 3 – $W=18\%$

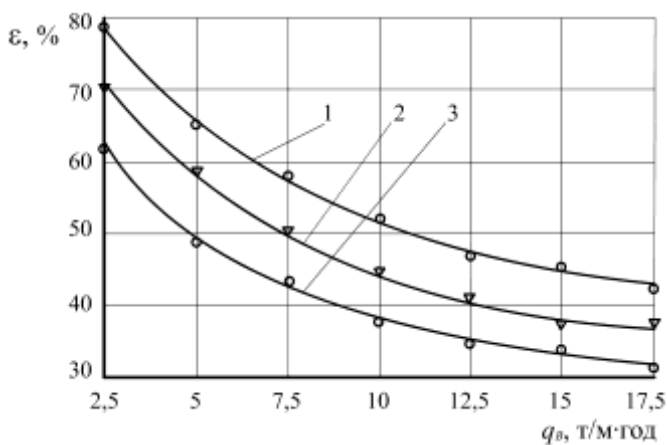


Рис. 4.10. Залежність ефективності сепарації дрібних домішок від питомого навантаження при різній кількості смітних домішок:

1 – $\Phi = 5\%$, 2 – $\Phi = 10\%$, 3 – $\Phi = 15\%$

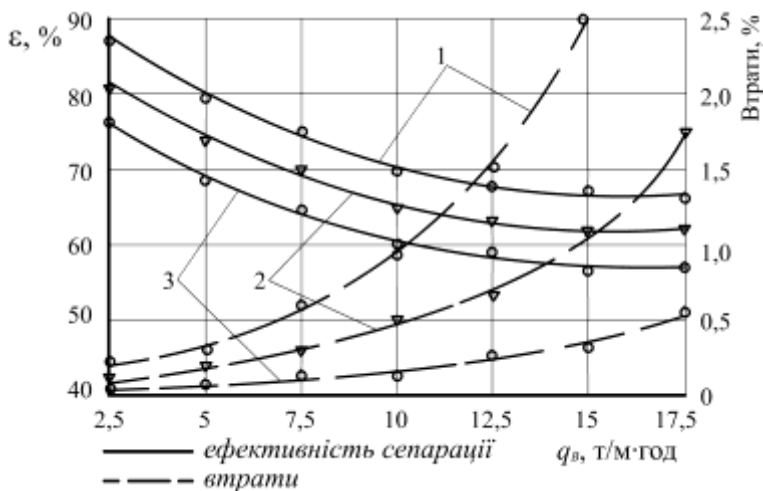


Рис. 4.11. Залежність ефективності сепарації крупних домішок від питомого навантаження: $\Phi = 4\%$, $R = 0,3$ м, $b_0 = 4$ мм,

1 – $b_k = 4,5$ мм, 2 – $b_k = 5,0$ мм, 3 – $b_k = 5,5$ мм

Ефективність сепарації крупних домішок визначали з розхилом прутків рівним і більше величини класового проміжку для встановлення можливості підвищення питомого навантаження на одиницю площі решета. Графічні залежності ефективності виділення крупних домішок при їх вмісті 4% (рис. 4.11) свідчать про те, що зі збільшенням розхилу прутків ефективність сепарації також зменшується, але з'являється можливість проведення процесу при більших значеннях питомого навантаження. Наприклад, при $b_k = 4,5$ мм, що відповідає $\Delta b = 0,5$ мм, втрати повноцінного зерна у відходи перевищують 0,5% при питомому навантаженні q_B більше 7 т/м·год, ефективність сепарації при цьому складає $\varepsilon = 77\%$. При збільшенні величини розхилу до $\Delta b = 1,0$ мм при зниженні ефективності сепарації до $\varepsilon = 65\%$ питому продуктивність можна підвищити до 10 т/м·год, а при $\Delta b = 1,5$ мм $\varepsilon = 57\%$ до 18 т/м·год.

4.5. Результати порівняльних випробовувань

Для оцінки ефективності роботи були проведені його порівняльні випробовування з сепаратором даного класу 3Г-25, а також з плоским коливним решетом зерноочисної машини ОВС-25 та віброцентифугою Є.С.Гончарова. Дослідження виконували на зерновому воросі насіння пшениці з нормальною вологістю (14,3-15,1%) і природнім вмістом підсіву у вихідному матеріалі 10% на підсівному решеті з робочими розмірами $b_0 = 1,8$ мм, $b_k = 2,0$ мм. Величина питомого навантаження на одиницю довжини решета дослідного зразка складала в середньому $q_B = 6,7$ т/м·год, (рис. 4.12).

Результати випробовувань експериментального інерційно-гравітаційного сепаратора підтвердили його працездатність в широкому діапазоні робочих навантажень. Запропонована технологічна схема

інерційно-гравітаційного сепаратора дозволила підвищити його питому продуктивність порівняно з машинами аналогічного призначення на 18-20%. Досягнута при цьому питома продуктивність перевищує в 1,3-1,5 рази питому продуктивність плоских решіт при рівнозначній повноті розділення.

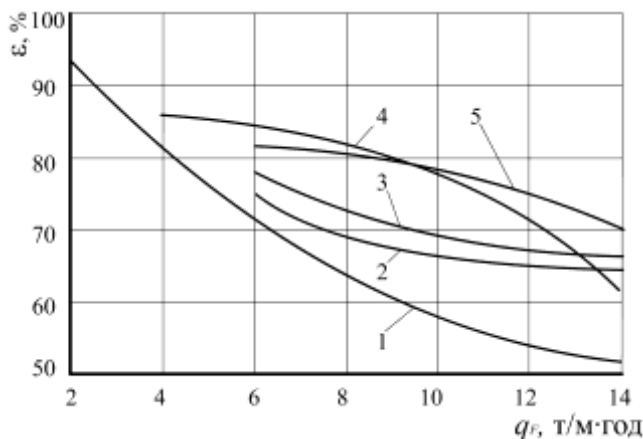


Рис. 4.12. Результати порівняльних випробувань решітчастих сепараторів при виділенні з пшениці дрібних домішок: 1 – плоске коливне решето ОВС-25; 2 – нерухоме плоске решето М.Є.Авдєєва; 3 – віброцентрифуга Є.С.Гончарова; 4 – зерноочисник СЗГ-25, 5 – експериментальне решето

Результати випробувань показали, що розроблений технологічний процес решітчастого сепарування на інерційно-гравітаційному сепараторі поряд з високою питомою продуктивністю має ряд інших переваг. Решето має просту конструкцію і характеризується надійністю в роботі. Самоочищення здійснюється за рахунок розхилу прутків, що не вимагає додаткових пристроїв, спрощує конструкцію сепаратора, зменшує питому енерго- та матеріалосмкість розробленого сепаратора порівняно з промисловими машинами.

Проведені експериментальні дослідження показали, що запропонований інерційно-гравітаційний сепаратор зернових сумішей є працездатним.

1. Результатами експериментальних досліджень підтверджено адекватність розроблених математичних моделей реальному процесу. Ступінь впливу неврахованих факторів не перевищує 6,2%, що знаходиться в межах допустимої похибки експерименту. Математичні моделі можуть бути рекомендовані при розрахунку характеристик процесу і виборі параметрів робочих органів сепараторів запропонованого типу.

2. Встановлено, що з метою отримання максимального технологічного ефекту, процес сепарації доцільно здійснювати на двох решітчастих поверхнях, на одній із яких виділяти тільки крупні домішки, а на іншій – тільки дрібні.

3. Аналіз отриманих математичних моделей за допомогою параметра приведеної питомої інтенсивності просіювання Π показує, що в даних інтервалах варіювання факторів максимальне значення Π досягається при показникові кінематичного режиму $K = 4 \dots 6$ (радіус решета $R = 0,2 \dots 0,4$ м) для дрібних домішок і $K = 3 \dots 5$ (радіус решета $R = 0,3 \dots 0,5$ м) для крупних домішок. В інших випадках він зменшується, бо при швидкості $V = 4$ м/с (із умови забезпечення швидкості у завантажувальному пристрої) збільшення K відбувається за рахунок збільшення радіусу решета R , що приводить до заклинення часток зерна в отворах.

4. Розхил прутків, який перевищує величину класового проміжку для колосового решета, суттєво не впливає на процес сепарації і дозволяє проводити процес при більших питомих навантаженнях. При підвищенні величини розхилу з $\Delta b = 0,5$ мм до 1,5 мм питоме навантаження q_B можна збільшити з 7 т/м·год до 18 т/м·год при зниженні ефективності сепарації від $\varepsilon = 77\%$ до $\varepsilon = 57\%$.

5

МЕТОДИКА ВИБОРУ І РОЗРАХУНКУ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ СЕПАРАТОРА

5.1. Принципова схема запропонованого сепаратора

Приведена методика вибору і розрахунку основних конструктивних елементів і параметрів сепаратора розроблена на основі комплексного аналізу проведених теоретичних і експериментальних досліджень процесу інерційно-гравітаційного сепарування зерна. По аналогії із загальноприйнятими методиками розрахунку зерноочисних машин [33, 67] ряд параметрів інерційно-гравітаційного сепаратора вибирається також з урахуванням конструктивно-технологічних міркувань.

В задачу методики входить визначення параметрів сепаратора, які обумовлюють як надійність його в роботі, так і забезпечення необхідних значень ефективності виділення прохідової фракції.

Процес розділення в інерційно-гравітаційному сепараторі здійснюється без підведення енергії від зовнішніх джерел, і в ньому відсутні спеціальні пристрої для очищення просіюючих поверхонь, тому найбільш відповідним етапом розрахунку сепаратора з точки зору надійності його в роботі є визначення області параметрів, які обумовлюють рух часток по клиноподібних отворах решета без заклинення.

Аналіз результатів рішення детермінованої математичної моделі досліджуваного процесу дозволив встановити при ізолюваних умовах його проведення вплив конструктивних елементів сепаратора, фізико-механічних властивостей оброблюваної зернової суміші і умов заклинення часток. Експериментальні дослідження по перевірці адекватності детермінованої математичної моделі визначили напрямки її подальшого

аналізу при реальних умовах ведення процесу для встановлення кількісного взаємозв'язку параметрів сепаратора, які забезпечують умови руху часток з різними фізико-механічними властивостями.

Для визначення геометричних параметрів решета, яке забезпечує необхідну повноту виділення прохідової фракції, в запропонованій методиці використовуються результати аналізу математичної моделі процесу сепарації, побудованої на основі елементів теорії ймовірності.

Для проектування сепаратора, крім заданої продуктивності, необхідно мати відомості про вид і склад вихідної зернової суміші, вимоги до якості очищення (чистота кінцевого продукту і допустима величина його втрат з відходами). Якщо сепаратори проектують для потокової лінії, то до уваги повинні бути прийняті схема технологічного процесу і здатність машини вписуватися конструкцією в потокову лінію. В цьому випадку величиною продуктивності по подачі Θ_{pod} для сепаратора є продуктивність по виходу $\Theta_{вих}$ попередньої машини, яка входить в потокову лінію.

Сепаратор (рис. 5.1) включає завантажувальний пристрій 1 із заслінкою 2, направляючі лотки 3 і 14, колосове 8 і підсівне 9 решета (рис. 5.2), перегородки 6, 7, 11 і патрубки для вивантаження фракцій різного гранулометричного складу 10, 12, 13. Решета сепаратора 8 і 9 виготовлені із прутків круглого профілю і закріплені на осях 4 і 5. При цьому отвори решіт розширюються в напрямку руху оброблюваного матеріалу за рахунок збільшення зазорів між рядом розташованими прутками на осях 4, 5 вгору і вниз у горизонтальній площині. Круглий профіль прутків сприяє орієнтації часток зерна відносно отворів, а також створює сприятливі умови для виходу прохідових часток в тому місці решета, де ширина його отворів відповідає розміру часток.

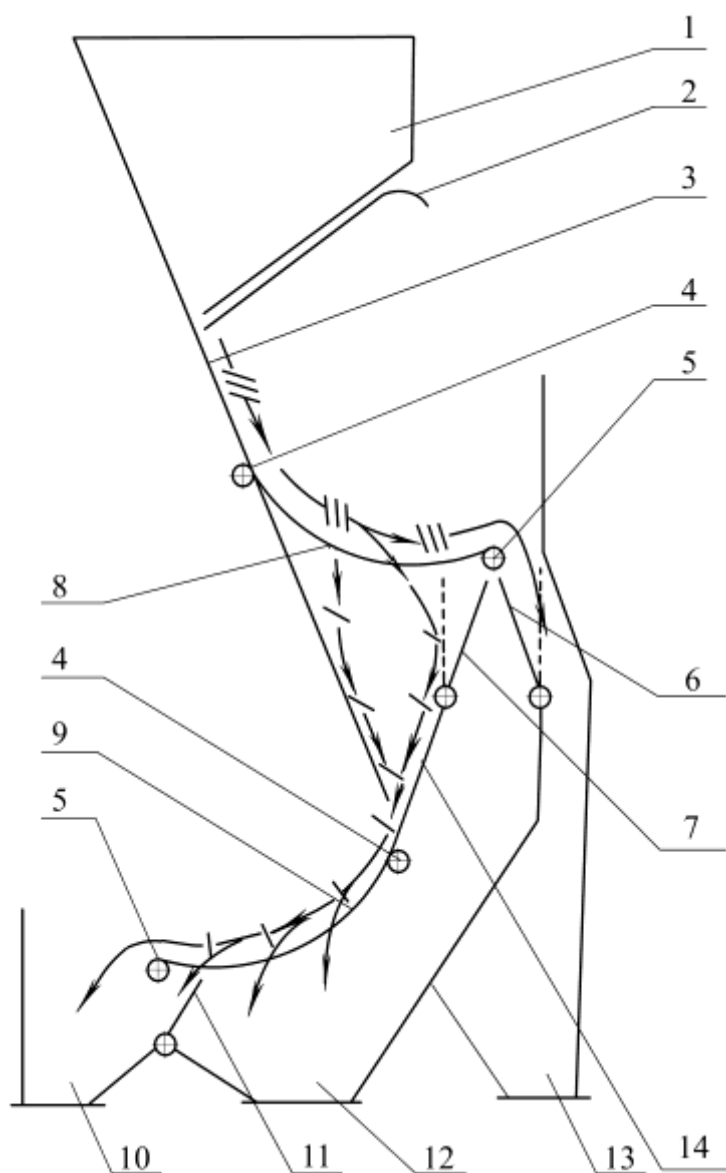


Рис. 5.1 Схема запропонованого сепаратора

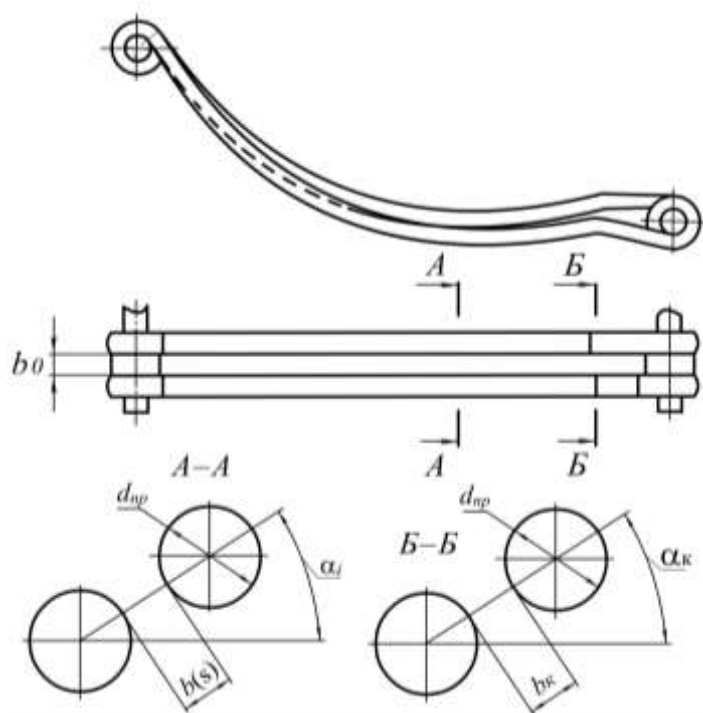


Рис. 5.2. Схема решета

Сепаратор працює таким чином. Вихідний зерновий матеріал із завантажувального пристрою 1 по направляючій 3 поступає на колосове решето 8 і під дією складової відцентрової сили, створеної силою тяжіння, направленої вздовж клиноподібних повздовжніх отворів, рухається до кінця решета. Частина зернової суміші (повноцінне зерно і дрібні домішки), які пройшли через решето, поступають на направляючий лоток 14, а з нього вони направляються на підсвіне решето 9. Враховуючи, що при очищенні зернових сумішей різного гранулометричного складу можливе попадання повноцінного зерна як з крупними так і дрібними домішками, встановлені регулювальні заслінки 6, 11. Розділення зернової

суміші в приведеному сепараторі може відбуватися на три фракції, які виводяться через патрубки 10, 12, 13, а також при необхідності можливий варіант об'єднання крупних і дрібних домішок, для чого служить заслінка 6. Відокремлення легких домішок може здійснюватися повітряним потоком в аспіраційній колонці. В даному випадку відокремлення легких домішок не розглядається. Регулювання параметрів сепаратора при переході з одного режиму на інший може здійснюватися без зупинки технологічного процесу, що обумовлює можливість його використання в гнучких технологічних процесах з автоматизованою системою управління.

5.2. Принципи вибору і розрахунку основних параметрів сепаратора

Результати виконаних досліджень дозволяють розглядати запропонований інерційно-гравітаційний сепаратор придатним для попереднього очищення зерна. В якості прикладу розглянемо методику розрахунку сепаратора для розділення зерна на три фракції.

Нехай необхідно розрахувати параметри сепаратора продуктивністю Q з об'ємною масою зерна γ і коефіцієнтом тертя f , при цьому із зернової суміші необхідно виділити дрібні домішки з розмірами менше 1,8 мм і крупні з розмірами більше 4,0 мм. Довжину завантажувального лотка при визначеній швидкості на початку решета можна знайти за формулами (2.1), (2.2) при необхідному показникові кінематичного режиму K , який встановлюють на основі рис.4.4. Тоді довжина лотка завантажувального пристрою

$$S_{\text{л}} = \frac{V^2 - V_0^2}{2g[\cos \Theta_0 - f \sin \Theta_0 (1 + \frac{nH}{B_{\text{л}}})]}. \quad (5.1)$$

Ширина вікна бункера відповідає ширині решета. Тоді

$$\Theta_0 = \arcsin \frac{B_B}{S_{\text{л}}} \quad (5.2)$$

Продуктивність завантажувального пристрою буде визначатися заданою продуктивністю сепаратора $Q = Q_B = B_B HV$, де H – висота шару зерна; V – швидкість витікання зерна із бункера. Питоме навантаження на одиницю ширини решета визначається формулою

$$q_B = \frac{Q}{B_p} = \frac{B_B HV}{B_p} = HV, \quad (5.3)$$

де Q – продуктивність решета; B_p – ширина решета.

Ступінь розділення визначається за формулою

$$\varepsilon = 1 - e^{-\mu L}, \quad (5.4)$$

де μ – коефіцієнт сепарації; L – довжина решета.

Із формули (5.4) довжина решета

$$L = \frac{1}{\mu} \ln\left(\frac{1}{1-\varepsilon}\right). \quad (5.5)$$

Враховуючи, що процес сепарації можливий тільки на чверті круга, визначимо радіус решета R за формулою

$$R = \frac{2}{\mu\pi} \ln\left(\frac{1}{1-\varepsilon}\right). \quad (5.6)$$

З урахуванням попередніх зауважень, продуктивність сепаратора

$$Q = \gamma \omega B H \frac{2}{\mu\pi} \ln\left(\frac{1}{1-\varepsilon}\right). \quad (5.7)$$

Для визначення продуктивності сепаратора з урахуванням приведених вище факторів необхідно знати коефіцієнт сепарації μ . Коефіцієнт сепарації μ визначаємо на основі запропонованих теоретичних досліджень (рис. 2.21). Для знаходження ширини отвору в

кінцевій частині в залежності від кута розхилу прутків у поперечному перерізі розроблена номограма (рис. 5.3).

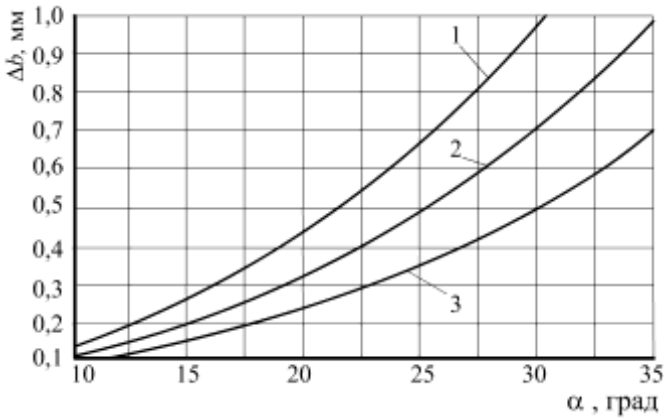


Рис.5.3. Номограма для визначення кута розхилу прутків у поперечному перерізі при необхідній ширині отвору решета в кінцевій частині:

$$1 - d_{np}=1,5 \text{ мм}; 2 - d_{np}=3 \text{ мм}; 3 - d_{np}=5 \text{ мм}$$

Розрахунок другої ступені для відокремлення дрібних домішок аналогічний. Орієнтовну висоту сепаратора без врахування висоти бункера можна визначити за формулою

$$H = H_{1cm.} + H_{2cm.}, \quad (5.8)$$

де $H_{1cm.}$, $H_{2cm.}$ – відповідно висота першої і другої ступені сепаратора.

$$H_{1cm.} = h_l + R, \quad (5.9)$$

де h_l – висота лотка завантажувального пристрою; R – радіус решета.

Висота другої ступені розраховується аналогічно. При отриманні задовільних значень у відповідності до експлуатаційних і монтажних вимог розрахунок сепаратора завершується.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що гравітаційні сепаратори традиційної схеми очищення з перфорованими решетами, які мають постійний розмір отворів, практично досягли межі вдосконалення. Перспективи подальшої інтенсифікації процесу сепарації зерна пов'язані з пошуком нових принципів обробки на основі використання додаткових силових полів.
2. Значного підвищення ефективності решітчастого сепарування зерна при його післязбиральному очищенні і сортуванні, зменшення енерго- і матеріаловитрат можна досягти за рахунок використання інерційно-гравітаційних силових полів на решетах з поздовжніми отворами, які розширюються в напрямку руху оброблюваного матеріалу.
3. Розроблені математичні моделі процесу руху та сепарації, які пов'язують основні конструктивні параметри, фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу і умови подачі його на решітчасту поверхню, дозволили встановити, що при підвищенні інтенсивності процесу сепарації оптимальною в інерційно-гравітаційних решетах є клиноподібна форма отворів, яка обумовлює незабивання їх частками з розмірами, близькими до розмірів отворів.
4. Проведені теоретичні дослідження процесу сепарації зерна дозволили вивести аналітичні залежності руху частки по поверхні решета, умови проходу зерна через клиноподібні отвори решета, оптимізувати параметри сепаратора. Встановлено, що розхил прутків решета в кінцевій частині до $\Delta b = 1,5$ мм суттєво не впливає на якісні показники роботи інерційного сепаратора.
5. Встановлено, що самоочищення решіт сепаратора, коли величина розхилу прутків не перевищує класового проміжку, забезпечується при мінімальних значеннях показника кінематичного режиму $K > 1$.

6. Максимальне значення питомої інтенсивності сепарації Π досягається при показникові кінематичного режиму $K = 4 \dots 6$ (радіус решета $R = 0,2 \dots 0,4$ м) для підсівного і $K = 3 \dots 5$ (радіус решета $R = 0,3 \dots 0,5$ м) для колосового решіт. В інших випадках при забезпеченні швидкості руху зерна під дією гравітаційних сил вона зменшується, а підвищення K за рахунок збільшення радіусу решітки R приводить до заклинення часток зерна в решеті.
7. Підвищення питомого навантаження для колосового решета при забезпеченні агровимог до попереднього очищення зерна можливе за рахунок збільшення величини розхилу прутків більше класового проміжку. При збільшенні величини розхилу з $\Delta b = 0,5$ мм до 1,5 мм питома навантаження q_B можна збільшити з 7 т/м·год до 18 т/м·год при зниженні ефективності сепарації від $\varepsilon = 77\%$ до $\varepsilon = 57\%$, що допускається агротехнічними вимогами до попереднього очищення зерна.
8. Результати порівняльних випробовувань запропонованого інерційного сепаратора та оцінка досліджуваного процесу підтвердили високу ефективність нового сепаратора. Питома продуктивність при рівнозначній повноті розділення оброблюваного матеріалу в 1,3-1,5 рази перевищує відповідні показники сепарації серійними машинами аналогічного призначення. При використанні запропонованого інерційно-гравітаційного сепаратора за рахунок підвищення продуктивності, зниження енерго- і матеріалоємності річний економічний ефект на одну машину з урахуванням капітальних вкладень складає 10210,7 грн. за цінами станом на 1 вересня 2013 року.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Авдеев А.В. Создание комплексов машин для уборки и стационарной обработки урожая / А.В. Авдеев, Г.В. Ануфриев // Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 1988.- №11.- С. 30-31.
2. Авдеев А.В. Повышение эффективности зерноочистительно-сушильных комплексов и линий / А.В. Авдеев, М.Ф. Машковцев, В.Н. Полуэктов // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1988.- №9.- С. 53-54.
3. Авдеев Н.Е. Центробежные сепараторы для зерна / Н.Е. Авдеев.- М.: Колос, 1975.- 152 с.
4. Авдеев Н.Е. Принципы построения модели идеального сепаратора / А.В. Авдеев // Докл. ВАСХНИЛ.- 1978.- № 11.- С. 38-40.
5. Авдеев Н.Е. Интенсификация процесса сепарирования зерновых материалов в сложном силовом поле / А.В. Авдеев // Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 1987.- №3.- С. 27-31.
6. Авдеев Н.Е. Новый принцип сепарирования зернистых материалов / Н.Е. Авдеев // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1987.- №10.- С. 24-27.
7. Авдеев Н.Е. Центробежный сепаратор для предварительной очистки зерна / Н.Е. Авдеев, Г.Г. Странадко // Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 1993.- №3.- С. 17-21.
8. Авдеев Н.Е. Снижение энергоемкости инерционного сепарирования / Н.Е. Авдеев, Ю.А. Саликов, Ю.В. Чернухин // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1999.- №1.- С. 33-35.
9. Ануфриев Г.В. Состояние и некоторые пути совершенствования машин для предварительной очистки зерна / Г.В. Ануфриев, О.С. Тарник // Исследование процессов и рабочих органов машин для

обработки зерновых культур и послеуборочной обработки зерна.- М.: НПО ВИСХОМ.- 1989.- С. 103-109.

10. Бабенко А.П. Вимоги до сортувальних машин / А.П. Бабенко, М.О. Демидко // Техніка АПК.- 1995.- №2.- С. 9-10.
11. Бабченко В.Д. Высокопроизводительные машины для очистки зерна / В.Д. Бабченко, А.М. Корн, А.С. Матвеев.- М.: ВНИИ ИТЭИ, 1982.- 50 с.
12. Барский М.Д. Критерии оптимизации отдельных процессов / М.Д. Барский, И.П. Плаксин.- М.: Наука, 1987.- 119 с.
13. Бать М.И. Теоретическая механика в примерах и задачах / М.И. Бать, Г.Ю. Джанелидзе, А.С. Кельзон.- М.: Наука, 1966.- Т.2.- 663 с.
14. Бакум Н.В. Определение математических параметров, обеспечивающих вибродвижение слоя на решетке, совершающее винтовые колебания / Н.В. Бакум, А.В. Миняйло // Тракторная энергетика в растениеводстве.- Харьков: ХГТУСГ, 2000.- С. 178-180.
15. Бок Н.Б. Интенсификация сепарирования зерна цилиндрическими решетками / Н.Б. Бок, Т.Т. Кузьмин // Земледельческая механика.- М.: Машиностроение, 1968. С. 24-27.
16. Быков В.С. Повышение производительности плоских решет / В.С. Быков // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1991.- №1.- С. 58-59.
17. Валиев Х.Х. Высокопроизводительные рабочие органы для предварительной очистки влажного зернового вороха / Х.Х. Валиев, Ф.Н. Эрк, С.А. Вайнруб // Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 1990.- №6.- С. 21-22.

18. Василенко П.М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин / П.М. Василенко.- К.: Изд-во УСХА, 1960.- 283 с.
19. Василенко И.Ф. Теория соломотряса / И.Ф. Василенко // Сборник трудов по земледельческой механике. Л.-М.: Сельхозиздат, 1961.- Т. VI.- С. 69-92.
20. Васильковский М.И. Проблемы совершенствования процессов очистки и сортирования зерна на решетках / М.И. Васильковский, П.Г. Лузан // Повышение технического уровня сельскохозяйственных машин.- К.: УМК ВО, 1991.- С.31-36.
21. Васильковский М.И. Совершенствование решетных сепараторов для зерна / М.И. Васильковский, П.Г. Лузан // Республиканская НТК "Проблемы конструирования и технологии производства с.-г. машин".- Кировоград: КИСХМ.-1991.- С.18-19.
22. Васильковский М.И. Совершенствование процесса сепарирования зерна на решетках / М.И. Васильковский, П.Г. Лузан // Тези доповідей та виступів наук. практ. конф.: "Інженерні проблеми с.-г. виробництва України".- К.: АІНУ, ААНУ.-1994.- С.76-78.
23. Васильковский М.И. Повышение эффективности сепарации сыпучих материалов на решетках / М.И. Васильковский, П.Г. Лузан, А.М. Васильковский // Тезисы региональной научно-практической конф. "Проблемы разработки производства и эксплуатации подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин".- Кировоград: КИСМ.-1994.- С. 28-29.
24. Васильковський М.І. Аналіз процесу відцентрової сепарації зерна на решетках / М.І. Васильковский, П.Г. Лузан, О.М. Васильковский //

Розробка і технологія виробництва сільськогосподарських машин.- К.: ІСДО, 1994.- С.18-20.

25. Васильковский М.И. Критерии для оптимизации и оценки раздельных процессов сепарации зерна на решетках / М.И. Васильковский // Конструирование и технология производства с.-г. машин: Респ. межвед. науч.-техн. сб.- К.: Техніка, 1984.- Вып.14.- С.28-30.
26. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментальных исследований и обработка опытных данных / Г.В. Веденяпин.- М.:Колос, 1973.- 139 с.
27. Вежбицки К.М. Исследование разделительного процесса зерновой смеси в конусном триере / Вежбицки К.М., Размыслович И.Р., Скварски Б.В. // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- Минск: ЦНИИ-МЭСХ НЗ СССР.- 1990.- Вып. 33.- С. 76-87.
28. Великанов К.М. и др. Расчеты экономической эффективности новой техники: Справочник / Под общ. ред. К.М.Великанова.- 2-е изд., перераб. и доп.- Л.: Машиностроение, 1990.- 448 с.
29. Волошин М.І. Дослідження силових полів решіт зерноочисних машин / М.І Волошин // Вісник аграрної науки.- 1994 - №11.- С. 89-92.
30. Гехтман А.А. Машина МПО-50 для предварительной очистки зерна / А.А. Гехтман, В.В. Антюхин // Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 1983.- №5.- С. 24-25.
31. Гехтман А.А. Семяочистительная машина МВО-20 / А.А. Гехтман, Н.К. Панкратов, М.Д. Правдивцева // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1990.- №11.- С. 36-37.
32. Гладков Н.Г. Сепарирование семян по свойствам их поверхности / Н.Г. Гладков.- М.: ЦБТИ, 1959.- Ч.1.- 204 с.
33. Гладков Н.Г. Зерноочистительные машины / Н.Г. Гладков.- М.: Машгиз, 1961.- 368 с.

34. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман.– М.: Высш. шк., 1977.– 479 с.
35. Гончаров Е.С. Моделирование процесса сепарирования зерновых материалов плоскими и вибрационно-центробежными решетками / Е.С. Гончаров // Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 1976.- №6.- С. 23-25.
36. Гончаров Е.С. Технические резервы интенсификации послеуборочной обработки зерна / Е.С. Гончаров // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- К.: Урожай, 1980.- Вып.47.- С. 47-49.
37. Гончаров Е.С. Универсальные виброцентробежные сепараторы / Е.С. Гончаров // Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 1984.- №1.- С. 15-17.
38. Гортинский В.В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях / В.В. Гортинский, А.Б. Демский, М.А. Борискин.- М.: Колос, 1980.- 304 с.
39. Горячкин В.П. Теория просеивания зерна и вороха / В.П. Горячкин // Собр. соч. в трёх томах.- М.: Колос, 1965.- Т.1.- С. 244-253.
40. Гроздубинский В.А. Комплексная оценка эффективности сепарации / В.А. Гроздубинский, В.В. Дудка // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1986.- №1.- С. 53-54.
41. Гячев Л.В. Движение сыпучих материалов в трубах и бункерах / Л.В. Гячев.– М.: Машиностроение, 1968.– 184 с.
42. Дмитрюк О.П. Визначення основних конструктивно-технологічних параметрів гідросепаратора насіння зерняткових плодів / О.П. Дмитрюк // Вісник аграрної науки.- 1994.- №8.- С. 85-90.

43. Демский А.Б. Комплексное оборудование мукомольных заводов / А.Б. Демский, Г.Е. Птушкина, М.А. Борискин.- М.: Агропромиздат, 1985.- 214 с.
44. Елизаров В.П. Современные средства предварительной очистки зерна / В.П. Елизаров, А.С. Матвеев // Механизация и электрификация сельского хозяйства -1986.- №8.- С. 60-64.
45. Емельянов П.А. Усовершенствованное решето вибрационной зерноочистительной машины / П.А. Емельянов // Механизация и электрификация сельского хозяйства -1999.- №6.- С. 9-10.
46. Ермольев Ю.И. Применение гофрированных решет для первичной очистки зерновых культур / Ю.И. Ермольев // Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 1981.- №10.- С. 25-27.
47. Ермольев Ю.И. Применение гофрированных подсевных решет для очистки зерновых культур / Ю.И. Ермольев // Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 1984.- №6.- С. 17-18.
48. Завалишин Ф.С. Методы исследований по механизации сельскохозяйственного производства / Ф.С. Завалишин, М.Г. Мацнев.- М.: Колос, 1982.- 231 с.
49. Завгородний А.И. К исследованию процессов забиваемости и очистки решет зерноочистительных машин / А.И. Завгородний // Тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. конф. "Земледельческая механика и программирование урожая".- Волгоградский СХИ.- Волгоград, 1990.- С. 115-118.
50. Завгородний А.И. К исследованию очистки отверстий цилиндрического решета очистителем с комбинированными рабочими органами / Науковий вісник НАУ.- К.:,- 1998.- Вип. 9.- С. 135-138.

51. Заика П.М. Забиваемость решет / П.М. Заика, В.Ф. Ридный, А.В. Минайло // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства.- 1977.- №8.- С. 40.
52. Заика П.М. Сепарация семян по комплексу физико-механических свойств / П.М. Заика, Г.Е. Мазнев.- М.: Колос, 1978.- 228 с.
53. Заика П.М. Выбор размеров отверстий решет при последовательной обработке семенных смесей / П.М. Заика, Ю.А. Манчинский, Н.В. Бакум // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1984.- №12.- С. 20-21.
54. Заика П.М. и др. Движение сыпучих смесей по поверхности вибро-центробежного решета / П.М. Заика, Л.Н. Тищенко, Д.И. Мазоренко, Н.В. Слоновский // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1986.- №1.- С. 26-28.
55. Заика П.М. Аналитическое определение параметров разделения семенных смесей / П.М. Заика, В.А. Гудым, П.М. Юдицкий // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1987.- №1.- С. 7-9.
56. Заика П.М. Избранные задачи земледельческой механики: Практическое пособие / П.М. Заика. - К.: Изд-во УСХА, 1992.- 512 с.
57. Заика П.М. Вибрационная семяочистительная машина / П.М. Заика, Н.В. Бакум, С.С. Роменец // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1999.- №6.- С.9-10.
58. Занько М.П. Вибір режиму роботи молотильно-сепаруючого пристрою / М.П. Занько, М.І. Осіпов // Техніка АПК.- 1996.- №3.- С.10-11.
59. Зеленев Л.В. Послеуборочная обработка семенного зерна / Л.В. Зеленев // Техника в сельском хозяйстве.- 1982.- №12.- С. 23-25.
60. Зерноочиститель ЗГ-25: [Самарская область на страницах "КП"] // Комсомольская правда.- 1999.- 21 дек.- С. 6.

61. Зенков Р.Л. Бункерные устройства / Зенков Р.Л., Гриневич Г.П., Исаев В.С.– М.: Машиностроение, 1977.– 222 с.
62. Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов / Р.Л. Зенков.– М.: Машиностроение, 1964.– 251 с.
63. Зюлин А.Н. Результаты испытаний каскадного решетного сепаратора для зерна / А.Н. Зюлин, С.С. Ямников // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1982.- №10.- С. 52-53.
64. Иванов Н.М. Определение факторов, существенно влияющих на процесс сепарации струнными коническими решетками // Совершенствование технологии и технических средств послеуборочной обработки зерна.- Новосибирск: Сиб. НИИМЭХ, 1990.- С. 54-59.
65. Каменир Э.А. Оценка эффективности сепарации / Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1982.- №11.- С. 29.
66. Кожуховский И.Е. Зерноочистительные машины / И.Е. Кожуховский.- М.: Машиностроение, 1974.- 200 с.
67. Котов Б.І. Технічні засоби для зберігання зерна в господарствах України / Б.І. Котов, С.І. Коваль, Л.М. Шустик // Пропозиція.- 1999.- №10.- С.12-17.
68. Котов Б.І. Перспективи розвитку конструкцій зерно-насіннеочисної техніки / Б.І. Котов, М.І. Волошин // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин.- Кіровоград: КДТУ, 2001.- Вип. 31.- С. 110-112.
69. Кубышев В.А. Энергетические проблемы производства сельскохозяйственной продукции // Международный сельскохозяйственный журнал.- 1983.- №1.- С. 77-80.

70. Кузьмин М.В. Эластичное цилиндрическое решето / М.В. Кузьмин, В.Н. Чурюмов // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1987.- №1.- С.56
71. Летошнев М.Н. Сельскохозяйственные машины / М.Н. Летошнев.- М.-Л.: Сельхозгиз, 1949.- С. 675-681.
72. Летошнев М.Н. О движении с постоянным скольжением по фрикционной поверхности горизонтально расположенного вращающегося цилиндра / М.Н. Летошнев // Сборник трудов по земледельческой механике.- Л.-М.: Сельхозиздат, 1961.- Т-VI.- С.315-347.
73. Лузан П.Г. Интенсификация процесса сепарирования зерновых материалов под действием инерционных силовых полей / П.Г. Лузан, А.М. Васильковский, Ю.В. Мачок // Проблеми конструювання та експлуатації с.-г. техніки.- Кіровоград: КІСМ, 1997.- С. 72-74.
74. Мельников С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Рошин.- Л.: Колос, 1972.- 200 с.
75. Минаев В.Н. Влияние частоты колебаний профилированных решет на эффективность выделения проходовой фракции / В.Н. Минаев, Х. Регге // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1983.- №12.- С. 17-19.
76. Минаев В.Н. Пути повышения производительности зерноочистительных машин / В.Н. Минаев, Х. Регге // Техника в сельском хозяйстве.- 1990.- №1.- С.16-17.
77. Лекин Я.Р. Модернизация рассевов / Я.Р. Лекин, И.И. Штанько, Б.М. Берестнев // Мукомольно-элеваторная промышленность.- 1986.- №10.- С. 37-39.

78. Нелюбов А.И. Пневмосепарирующие системы сельскохозяйственных машин / А.И. Нелюбов, Е.Ф. Ветров.- М.: Машиностроение, 1977.- 190 с.
79. Непомнящий Е.А. Кинетика сепарирования зерновых смесей / Е.А. Непомнящий.- М.: Колос, 1982.- 175 с.
80. Олейников В.Д. Коническое решето для предварительной очистки зерна / В.Д. Олейников, В.В. Кузнецов // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства.- 1968.- №9.- С. 18-20.
81. Олейников В.Д. и др. Агрегаты и комплексы для послеуборочной обработки зерна.- М.: Колос, 1977.- 112 с.
82. Пархоменко М.Д. Устройство регистрации семенного потока / М.Д. Пархоменко, А.А. Лукьяненко, И.Н. Горевой // Проблеми розробки, виробництва та експлуатації с.-г. техніки.- Кіровоград: КІСМ, 1995.- С. 132-137.
83. Петрусов А.И. Зерноперерабатывающие высокочастотные вибрационные машины / А.И. Петрусов.- М.: Машиностроение, 1975.- 40 с.
84. Погорелый Л.В. Инженерные методы испытания сельскохозяйственных машин / Л.В. Погорелый.- К.: Техника, 1981.- 176 с.
85. Пожелене А.В. Электроочистка семян льна / А.В. Пожелене // Техника в сельском хозяйстве.- 1983.- №7.- С. 58
86. Прайс-листы: [Газета украинской буржуазии] // Бизнес.- 2000.- 31 июля- 260 с.
87. Саликов Ю.А. Аналитическая оценка энергоемкости процесса инерционного сепарирования / Ю.А. Саликов // Тр. ВНИИ КП, 1985.- Вып. 26.- С. 66-72.
88. Слоновский Н.В. Параметры расклинивания семян при ударном методе очистки решет вибрационных семяочистительных машин /

- Н.В. Слоновский, А.П. Заика // Совершенствование конструкций рабочих органов сельскохозяйственной техники.- Харьков: Харьк. СХИ.- 1988.- С. 96-104.
89. Совершенствование процесса послеуборочной обработки зерна / Э.И. Липкович и др. // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1990.- №3.- С. 20-22.
90. Соколов А.Я. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна / А.Я. Соколов.- М.: Колос, 1975.- 496 с.
91. Суконкин Л.М. Влияние аэродинамического воздействия на эффективность решетного сепаратора / Л.М. Суконкин, В.А. Веденеев, Н.А. Ревенко // Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 1983.- №3.- С. 15-16.
92. Тарасенко П.А. Перспективы снижения травмирования семян при послеуборочной обработке / П.А. Тарасенко, М.Э. Мерчалова // Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 1996.- №11.- С. 24-25.
93. Тарушкин В.И. Новые сепараторы семян // Механизация и электрификация сельского хозяйства / В.И. Тарушкин.- 1987.- №12.- С. 3-10.
94. Технологические линии и оборудование для поточной послеуборочной обработки зерна и семян трав за рубежом / А.В. Авдеев, Г.В. Ануфриев, В.Э. Герц и др.- М.: ЦНИИТЭИ Тракторсельхозмаш, Вып.7.- 1989.- 63 с.
95. Тиц Э.Л. и др. Машины для послеуборочной поточной обработки семян.- М.: Машиностроение, 1967.- 447 с.
96. Тіщенко Л.Н. Методика моделювання процесу сепарування системи “решето-зерновий потік” / Л.Н. Тіщенко, А.В. Мандрика.- К.: Науковий вісник НАУ.- 1998.- Вип.№9.- С. 154-157.

97. Туаев М.В. Математическая модель движения круглого тела в цилиндрических рабочих органах и методика ее численной реализации / М.В. Туаев // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1986.- №5.- С. 10-15.
98. Шмигель В.В. Оптимизация режима работы установки для разделения семян овса и овсяго / В.В. Шмигель // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1983.- №12.- С. 40-42.
99. Ямпиров С.С. Сепараторы для предварительной очистки зерна / С.С. Ямпиров // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1999.- №12.- С. 17-21.
100. А.с. 54062 СССР, МКИ В 07 В 1/28. Консольный грохот / А.В. Булгаков, В.С. Волотковский, Е.Г. Нохрин (СССР).- №1360648/03; Заявлено 08.09.69; Опубл. 30.12.76, Бюл. №48.- 2 с.
101. А.с. 3226001 СССР, МКИ В 07 В 13/10. Сепаратор для очистки семян от примесей / П.М. Заика, Г.Е. Мазнев (СССР).- №1458229/30-15; Заявлено 06.07.70; Опубл. 19.01.72, Бюл. №4.- 2 с.
102. А.с. 732027 СССР, МКИ В 07 В 1/12. Колосниковая решетка / Б.Н. Тартаковский и др. (СССР).- №2512157/29-03; Заявлено 01.08.77; Опубл. 05.05.80, Бюл. №17.- 3 с.
103. А.с. 732032 СССР, МКИ В 07 В 7/083. Центробежный сепаратор / И.И. Меньшиков, В.А. Демин (СССР).- №2524986/29-03; Заявлено 21.09.77; Опубл. 05.05.80, Бюл. №17.- 2 с.
104. А.с. 954045 СССР, МКИ В 07 В 1/26. Центробежная зерноочистительная машина / Д.И. Мазоренко, Л.Н. Тищенко (СССР).- №3219907/30-15; Заявлено 15.12.80; Опубл. 30.08.82, Бюл. №32.- 3 с.

105. А.с. 1031535 СССР, МКИ В 07 В 1/00. Просеивающая поверхность / М.Г. Михлин и др. (СССР).- №29978511/29-03; Заявлено 23.10.80; Оpubл. 30.07.83, Бюл. №28.- 3 с.
106. А.с. 923645 СССР, МКИ В 07 В 1/00. Колосниковый грохот / А.И. Иголкин (СССР).- №2996410/29-03; Заявлено 11.08.80; Оpubл. 30.04.82, Бюл. №16.- 4 с.
107. А.с. 990332 СССР, МКИ В 07 В 1/46. Сито / В.И. Журавлев и др. (СССР).- №3332073/29-03; Заявлено 24.08.81; Оpubл. 23.01.83, Бюл. №3.- 3 с.
108. А.с. 997839 СССР, МКИ В 07 В 1/18. Сепаратор для разделения зернистой смеси на фракции по крупности / Е.Л. Сосновский (СССР).- №3352310/29-03; Заявлено 06.11.81; Оpubл. 23.02.83, Бюл. №7.- 5 с.
109. А.с. 1207531 СССР, МКИ В 07 В 13/07. Инерционный сепаратор / Н.Е. Авдеев. С.Б. Резуев (СССР).- №3763974/29-03; Заявлено 02.07.84; Оpubл. 30.01.86, Бюл. №4.- 3 с.
110. А.с. 1207514 СССР, МКИ В 07 В 1/04. Грохот / А.И. Васягин, В.Т. Атаманов (СССР).- №3735071/29-03; Заявлено 29.04.84; Оpubл. 30.01.86, Бюл. №44.- 4 с.
111. А.с. 1402378 СССР, МКИ В 07 В 1/40. Устройство для просеивания материалов / В.В. Хаустов, А.А. Шишкин (СССР).- №4126924/29-03; Заявлено 02.07.86; Оpubл. 15.06.88, Бюл. №22.- 3 с.
112. А.с. 1450886 СССР, МКИ В 07 В 1/04. Классификатор сыпучих материалов / Н.Е. Авдеев, А.Ф. Прокопенко, Ю.В. Чернухин (СССР).- №41850229/29-03; Заявлено 19.01.87; Оpubл. 11.01.89, Бюл. №2.
113. Пат. 24700 А Україна, МПК В 07 В 13/04. Решітковий сепаратор / Васильковський М.І., Васильковський О.М., Лузан П.Г., Осипов І.М.;

- заявник і патентовласник Кіровоград. нац. техн. ун-т.- №97063049;
заявл. 24.06.97; Опубл. 04.08.98.- 3 с.
114. Пат. 29822 А Україна, МПК В 07 В 13/04. Решітний сепаратор /
Васильковський М.І., Васильковський О.М., Лузан П.Г., Осипов І.М.;
заявник і патентовласник Кіровоград. нац. техн. ун-т.- №97073883;
заявл. 22.07.97; Опубл. 15.11.2000.- 3 с.
115. Dittrich F. Transportabler Ganzkorn- Feuchteschnellbestimmer.
Agrartechnik, Berlin 36 (1986) 6, S. 249.
116. Fischer E. Die Sichtung von Getreidekörnern durch Schüllesiebe. Die
Technik in der Landwirtschaft, Hohenheim / Stuttgart 12 (1931) 8, S. 227-
229.
117. Keiser H.V. Getreidefeuchteschnellbestimer. Rationalisierungs-Kurato-
rium für Landwirtschaft Kiel, Sonderdruck-Kartei für Rationalisierung
4.3.1.0(1979) S. 87-167.
118. Park J.K., Harmond J.E. A vertical rotating screen separator.- Agricultural
Engeneering, 1967, May. P. 275-277.
119. Ratsche A., Wie genau arbeiten Getreidefeuchtemesser? Top agrar,
Munster (1983) 6, S. 68-70.
120. Regge H., Minaev V. Zur zweckmäßigen Teilung von Profilsieben.
Agrartechnik, Berlin 32 (1982) 4, S. 184-185.
121. Regge H., Minaev V. Zur Theorie und Praxis der Feinkornabscheidung
eines profilierten Untersiebes in der Getreidereinigung. Agrartechnik,
Berlin 33 (1983) 4, S. 177-178.
122. Schindler D., Muller H., u.a. Neues Kornfeuchtemeßgerät für die
Getreide- und Feldwirtschaft. Agrartechnik, Berlin 35 (1985) 6, S. 283-
284.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. СТАН ТЕХНІКИ ТА ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СЕПАРАЦІЇ ЗЕРНА НА РЕШЕТАХ	5
1.1. Короткий огляд техніки для сепарації зерна на решетах	5
1.2. Аналіз основних результатів теоретичних досліджень процесу сепарації зерна на решетах	26
1.3. Обґрунтування перспективного напрямку сепарації зерна на решетах з клиноподібною формою отворів	31
2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СЕПАРАЦІЇ В ІНЕРЦІЙНО-ГРАВІТАЦІЙНОМУ СЕПАРАТОРІ..	39
2.1. Аналіз факторів, які впливають на рух зерна в сепараторі	39
2.2. Аналіз руху зерна в завантажувальному пристрої.....	41
2.3. Детермінована математична модель руху частки.....	44
2.3.1. Рух частки вздовж клиноподібного отвору	44
2.3.2. Визначення ширини отвору по довжині решета.....	48
2.3.3. Визначення кута розхилу прутків у вертикальній площині.....	49
2.3.4. Визначення кута, який визначає положення частки на решеті у поперечному перерізі.....	50
2.4. Аналіз математичної моделі руху частки.....	57
2.5. Розробка математичної моделі процесу сепарації.....	61
2.5.1. Теоретичне обґрунтування процесу сепарації.....	61
2.5.2. Аналіз математичної моделі процесу сепарації	68

3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	73
3.1. Методика визначення фізико-механічних властивостей.	73
3.1.1. Визначення коефіцієнтів тертя зерна.....	73
3.1.2. Визначення фракційного складу зерна та його вологості	75
3.2. Методика перевірки на адекватність математичних моделей	76
3.2.1. Опис будови і роботи експериментальної установки.....	76
3.2.2. Методика перевірки детермінованої математичної моделі руху частки по поверхні решета на адекватність..	81
3.2.3. Методика перевірки математичної моделі процесу сепарації. на адекватність	85
3.2.4. Методика визначення якості роботи решіт з клиноподібною формою отворів	87
3.3. Методика визначення ефекту сепарації в розробленому зерноочисному сепараторі	92
4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОЦЕСУ СЕПАРАЦІЇ В ІНЕРЦІЙНО-ГРАВІТАЦІЙНОМУ СЕПАРАТОРІ	97
4.1. Фізико-механічні властивості зерна	97
4.1.1. Коефіцієнти тертя зерна	97
4.1.2. Фракційний склад зерна.....	98
4.2. Експериментальна перевірка детермінованої математичної моделі на адекватність	99
4.3. Експериментальна перевірка математичної моделі процесу сепарації на адекватність	101

4.4. Експериментальна оцінка технологічних можливостей інерційно-гравітаційного сепаратора.....	114
4.4.1. Вплив вологості на ефективність сепарації	114
4.4.2. Вплив засміченості на ефективність сепарації	116
4.5. Результати порівняльних випробовувань.....	119
5. МЕТОДИКА ВИБОРУ І РОЗРАХУНКУ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ СЕПАРАТОРА.....	122
5.1. Принципова схема запропонованого сепаратора.....	122
5.2. Принципи вибору і розрахунку основних параметрів сепаратора.....	126
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	129
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	131

Наукове видання

**САЛО Василь Михайлович
ЛУЗАН Петро Григорович
БОГАТИРЬОВ Дмитро Володимирович**

**НАУКОВІ ОСНОВИ СЕПАРАЦІЇ ЗЕРНА НА РЕШЕТАХ
З КЛИНОПОДІБНОЮ ФОРМОЮ ОТВОРІВ**

Редактор: Сало В.М.
Технічний редактор: Лисенко В.Ф.
Комп'ютерна верстка: Лузан П.Г.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк.
Облік. видан. арк. 7,1. Тираж 300. Зам. № _____

Видавець і виготовлювач СПД ФО Лисенко В.Ф.,
25029, м. Кіровоград, вул. Пацаєва, 14, к. 1, кв. 101.
Свідотцтво суб'єкта видавничої справи №3904 від 20.10.2010 р.